

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

**"Aplicación y evaluación de tecnología de secado y
almacenamiento de la semilla de Piñón blanco
(*Jatropha curcas* L.), para conservar la calidad del
aceite, a ser utilizado en la producción de biodiesel,
en la E.E.A. El Porvenir - Distrito de Juan Guerra".**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

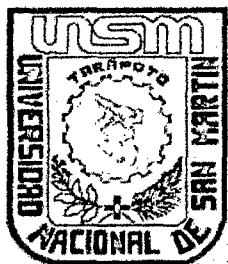
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Presentado por el Bachiller:

JHONNY ALEJANDRO ALEGRÍA SAAVEDRA

TARAPOTO - PERÚ
2014

Universidad Nacional de San Martín



Facultad de Ingeniería Agroindustrial

“Aplicación y evaluación de tecnología de secado y almacenamiento de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.), para conservar la calidad del aceite, a ser utilizado en la producción de biodiesel, en la E.E.A. El Porvenir - Distrito de Juan Guerra”

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Jhonny Alejandro Alegría Saavedra.

Tarapoto – Perú

2014



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

“Aplicación y evaluación de tecnología de secado y almacenamiento de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.), para conservar la calidad del aceite, a ser utilizado en la producción de biodiesel, en la E.E.A. El Porvenir - Distrito de Juan Guerra”

TESIS

Para optar por el título profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Presentado por el bachiller

Jhonny Alejandro Alegría Saavedra

SUSTENTADO Y APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO

Ing. Dr. ABNER OBREGON LUJERIO

PRESIDENTE

Ing. Dr. MARI L. MEDINA VIVANCO

SECRETARIO

Ing. M. Sc. JAIME G. GURRERO MARINA

MIEMBRO

Ing. Dr. OSCAR W. MENDIETA TABOADA

ASESOR

TARAPOTO – PERÚ

2014

DEDICATORIA

A mis padres:

ROSA SAAVEDRA M. y AGUSTÍN INGA G. por su constante apoyo y dedicación; a mis hermanos KATIA, ROSA y JUSTIN por su paciencia para poder culminar mi carrera.

A mis tíos:

WASHINGTON S. EDWIN S. LUDÍ S. PEPE S. PATRICIA S. y MARISELA P. por su apoyo incondicional y dedicado.

A mis abuelitos:

GENNER S. y ELIOVINA M. por sus consejos y cuidados.

AGRADECIMIENTO

Al Fondo para la Innovación Ciencia y Tecnología (FINCyT), por el financiamiento otorgado al presente trabajo de investigación.

Al Dr. Ing. OSCAR W. MENDIETA TABOADA, catedrático de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de San Martín, por su asesoramiento en la ejecución del presente trabajo de investigación.

Al Ing. RONAL RÍOS ROMERO director del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Estación Experimental Agraria El Porvenir, por el apoyo brindado.

Al Ing. RICHER GARAY MONTES, coordinador técnico; Ing. EDISON HIDALGO MELENDEZ, coordinador general y al Ing. ALEX MENDOZA ESPINOZA responsables del proyecto “Generación de tecnología de cosecha y Postcosecha para mejorar la calidad del aceite de piñón blanco (*Jatropha curcas* L.), en la región San Martín” contrato 030-2009 FINCyT – INIA, por el coasesoramiento.

A mis compañeros de labores: Carina Cubas, Jorge Fasanando, Leandro Paredes, Marilyn Aguado, Julio Vizcarra, Dalila Rosales, David Antoni, José Sánchez y Charly Reátegui. Por la colaboración y apoyo técnico.

ÍNDICE GENERAL

	Titulo	Pag.
	Resumen	16
	Abstract	17
I.	INTRODUCCIÓN	18
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	Piñón Blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	21
2.2.	Postcosecha del Piñón blanco	21
2.3.	Control de calidad en aceites para Biodiesel	22
2.4.	Control de calidad de biodiesel	25
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1.	Lugar y fecha de ejecución	34
3.2.	Materiales y reactivos	34
3.2.1.	Materiales de Laboratorio	34
3.2.2.	Reactivos de Laboratorio	35
3.2.3.	Equipos del laboratorio	36
3.2.4.	Materiales Utilizados en la construcción de los secadores solares (Plataforma y Parihuela)	36
3.3.	Metodología	37
3.3.1.	Obtención de la materia prima "semillas de Piñón blanco"	37
3.3.2.	Influencia de la temperatura y del área de secado en la calidad del aceite y en la cinemática de secado de la semilla de Piñón blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	38
3.3.3.	Influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón Blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	42
3.3.4.	Determinación de parámetros de almacenamiento óptimo de las semillas de Piñón Blanco	48
3.3.5.	Análisis biométrico de las semillas	51
3.3.6.	Determinación del contenido total de grasas	51
3.3.7.	Extracción de aceite en la prensa de tornillo sin fin	52
3.3.8.	Análisis físico-químico del aceite de Piñón Blanco	52
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	59
4.1.	Influencia de la temperatura y del área de secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	59

4.1.1.	Cinética de secado de la semilla de piñón blanco a temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C y 65°C con doble y simple área de contacto con el flujo de aire	59
4.1.2.	Calidad del aceite de piñón blanco proveniente de semillas secadas a temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C y 65°C con doble y simple área de contacto con el flujo de aire	71
4.2.	Influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón Blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	87
4.2.1.	Aspectos económicos	87
4.2.2.	Propiedades de secado	87
4.2.3.	Calidad de la semilla seca	103
4.2.4.	Calidad del aceite	107
4.3.	Determinación de parámetros de almacenamiento óptimo de las semillas de Piñón Blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.)	121
V.	CONCLUSIONES	126
VI.	RECOMENDACIONES	127
VII.	REFERENCIAS	128
VIII.	ANEXOS	132
ANEXO 01.	Valores de los resultados observados en el experimento "Influencia de la temperatura y del área expuesta al secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.).", análisis de varianza y prueba de Tuckey	132
ANEXO 02.	Valores de los resultados observados en el experimento "Influencia de la temperatura y del área expuesta al secado en la calidad del aceite de Piñón blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.).", análisis de varianza y prueba de Tuckey	141
ANEXO 03.	Valores de los resultados observados en el experimento "Influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón Blanco (<i>Jatropha curcas</i> L.).", análisis de varianza y prueba de Tuckey	160
ANEXO 04.	Análisis proximal de las semillas del Piñón Blanco	179
ANEXO 05.	Especificaciones del aceite de <i>Jatropha</i>	180
ANEXO 06.	Densidad del agua en función de temperatura	182
ANEXO 07.	Ficha técnica del piñón blanco, ecotipo Totorillayco	183
ANEXO 08.	Costos de construcción de los secadores solares	184
ANEXO 09.	Certificado de analisis físico-química (Analytik Service	186

RESUMEN

En la presente investigación se realizaron estudios como, influencia de la temperatura (35°C, 45°C, 55°C y 65°C) y del área (simple y doble) de secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.); influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite y determinación de parámetros de almacenamiento óptimo de las semillas de Piñón Blanco.

Para determinar los mejores tratamientos se realizaron análisis en las semillas (biométricos, contenido de humedad y grasa total) y análisis físico-químicos al aceite (índice de acidez, índice de peróxidos, índice de yodo, índice de saponificación, densidad a 15°C, viscosidad cinemática a 40°C, contenido de impurezas, humedad y materias volátiles, contenido de cenizas y punto de humo) acorde a los métodos oficiales, obteniéndose valores aceptables según la norma técnica (V DIN 51 605, 2010).

Las temperaturas de entre 45°C a 55°C, conservan mejor la calidad del aceite de Piñón Blanco para la producción de biodiesel, lo mismo para el caso del modelo de secador solar de Plataforma y además se puede utilizar las curvas de secado determinadas en el presente estudio para diseñar secadores industriales. Las condiciones apropiadas para almacenar las semillas de Piñón Blanco son: humedad relativa del ambiente menor de 70%, temperatura del ambiente menor de 25°C y contenido de humedad de equilibrio de la semilla de 0.1000 Kg agua/Kg m. s. calculada en las curvas de isotermas de adsorción y ajustadas con la ecuación de GAB, para prevenir reacciones de deterioro del aceite.

Los análisis físicoquímicos (índice de acidez, índice de peróxidos, índice de yodo, índice de saponificación, densidad a 15°C, viscosidad cinemática a 40°C, contenido de impurezas, humedad y materias volátiles, contenido de cenizas y punto de humo) indican que la calidad del aceite de Piñón Blanco producida en la E.E.A. EL PORVENIR – JUAN GUERRA, tiene buena calidad y está dentro de los estándares internacionales exigidos en aceite, como fuente de materia prima para la producción de Biodiesel.

ABSTRACT

In this research study as influence of temperature (35°C, 45°C, 55°C and 65°C) and (single and double) area drying oil quality and kinetics were performed seed drying white Pinion (*Jatropha curcas* L.), influence of model solar dryer in oil quality parameters and determining optimal seed storage Pinion white.

To determine the best treatment analyzes were performed on the seed (biometric, moisture content and total fat) and physical-chemical oil (acid value, peroxide value, iodine value, saponification value, density at 15°C, kinematic viscosity at 40°C, impurity content, moisture and volatile matter, ash content and smoke point) according to the official methods give acceptable values according to the technical standard (DIN V 51 605, 2010).

Temperatures between 45°C to 55°C, keep best quality oil Sprocket White for biodiesel production, as in the case of solar dryer model platform and you can also use the drying curves determined this study to design industrial dryers. Appropriate for storing seeds Pinion White conditions are ambient relative humidity less than 70%, less ambient temperature of 25°C and an equilibrium moisture content of the seed of 0.1000 kg water / kg m. s. curves calculated adsorption isotherms and fitted with the GAB equation to prevent oil deterioration reactions.

The physicochemical analysis (acid value, peroxide value, iodine value, saponification value, density at 15°C, kinematic viscosity at 40°C, impurity content, moisture and volatile matter, ash and smoke point) indicate that the quality of the oil produced in the Pinion Blanco E.E.A. EL PORVENIR - JUAN GUERRA, has good quality and is within the standards required in international oil as a raw material for the production of Biodiesel.

I. INTRODUCCIÓN.

El cultivo de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.), para producción de Biodiesel es una alternativa de desarrollo rural ya usado en varios países (India, Brasil, Guatemala), que permite la participación directa de la población rural dedicada a cultivos agrícolas en dar uso productivo a terrenos abandonados y terrenos deforestados, utilizándose el Piñón blanco como planta de reforestación por su rusticidad y aprovechando de sus semillas para la obtención de aceite y biodiesel. India, donde su cultivo había estado en manos de pequeñas productoras, se prepara para sembrar hasta 40 millones de hectáreas con Piñón blanco. British Petroleum tiene un proyecto experimental para producir biodiesel a partir de una plantación de 100 mil hectáreas en Indonesia. DaimlerChrysler experimenta con tres automóviles *Mercedes* movidos exclusivamente con *diesel* de Piñón blanco.

En el Perú se viene produciendo Piñón Blanco en las regiones y provincias de Cajamarca, Piura, Jaén y San Martín y ya se cuenta con plantas dedicadas a la producción de biodiesel a partir del aceite de la semilla de Piñón Blanco. En Lurín a 33 km al sur de Lima se encuentra la planta de la empresa Heaven Petroleum Productions (HPP) instalada en un terreno de 45.000 m², costó US\$25 millones y se alimenta con el cultivo de 5000 hectáreas de Piñón Blanco en Nazca, con lo que produce 120000 galones de combustible por día de Biodiésel Heaven HB100.

El cultivo de Piñón Blanco para la producción de biodiesel viene siendo promovido en la Región San Martín por instituciones nacionales e internacionales, invirtiendo en investigaciones y promoción, permitiendo esto plantear nuevas propuestas de generación de energía con base científica y tecnológica teniendo en cuenta la sostenibilidad del medio ambiente. La región San Martín cuenta con un área instalada de cultivo de Piñón blanco de 580 hectáreas en 9 provincias, con 268 beneficiarios, siendo la empresa Verdal RSM Perú SAC, quien cuenta con la mayor extensión con 353.5 hectáreas y sólo en el

mes de Mayo de 2011 se ha cosechado 5230 Kg de semillas (Proyecto Piñón – DRASAM 2011).

El origen de la materia prima tiene especial importancia en la calidad del biodiesel que se obtenga. La estructura molecular de los ácidos grasos del aceite, influye en la viscosidad, la densidad, el número de cetano, el punto de ebullición, estabilidad a la oxidación y otras propiedades del biodiesel. Los ácidos grasos libres presentes en el aceite y el contenido de humedad, influyen directamente en el rendimiento del proceso de obtención de biodiesel.

El cultivo de Piñón blanco es una actividad no desarrollada en lo referente a tecnología de post-cosecha y además tiene una gran importancia en la industria puesto que sus granos son fuente de aceite no comestible, el aceite de las semillas de Piñón blanco puede ser transformado en biodiesel mediante el proceso de Transesterificación, pudiendo ser utilizado como sustituto del petróleo que en estos últimos años presenta problemas como agotamiento de los recursos, contaminación del medio ambiente y alto costo. Por ello la importancia de investigar en tecnología de post-cosecha (secado y almacenamiento) del Piñón blanco con la finalidad de conservar la calidad del aceite para la obtención de Biodiesel.

La finalidad del presente trabajo de investigación es lograr los siguientes objetivos:

Objetivo General.

Conservar la calidad del aceite de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.), a ser utilizado en la producción de biodiesel, definiendo parámetros de secado y almacenamiento de la semilla, en la Región San Martín.

Objetivos Específicos.

Evaluar la cinética de secado de la semilla de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.), a 35°C, 45°C, 55°C y 65°C de temperatura con simple y doble área superficial expuesta al secado, y la influencia de la misma en la calidad del aceite.

Evaluar módulos de secadores solares (Plataforma, Parihuela y Secado Tradicional) y la influencia en la calidad del aceite de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.).

Determinar parámetros de almacenamiento óptimo de la semilla de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.).

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.).

Descripción. *Jatropha curcas*, conocida como Piñón Blanco, es una *Euphorbiaceae* que tiene propiedades medicinales. Nativa de América Central, fue difundida a Asia y África por comerciantes portugueses, como planta para cercar y hoy en día se ha expandido por el mundo entero, Torres (2007).

Las semillas contienen un aceite no comestible, que se puede utilizar directamente para aprovisionar de combustible lámparas y motores de combustión o se puede transformar en *biodiesel*, mediante un proceso de transesterificación. Además se usa para fabricar jabones. Un colorante también se puede derivar de la semilla, Torres (2007).

Taxonomía. Torres (2007), indica la siguiente clasificación taxonómica:

Reino	:	Plantae
Subreino	:	Tracheobionta
División	:	Magnoliophyta
Clase	:	Magnoliopsida
Subclase	:	Rosidae
Orden	:	Euphorbiales
Familia	:	Euphorbiaceae
Género	:	<i>Jatropha</i>
Especie	:	<i>curcas</i>

2.2. Postcosecha del Piñón Blanco.

La maduración de los frutos de Piñón blanco se clasificó en 6 estados fisiológicos (R₁, R₂, R₃, R₄, R₅ y R₆), figura 01, en la que se puede apreciar que el estado R₁ presenta coloración verde, R₂ verde amarillento, R₃ amarillo, R₄

amarillo con puntos color café, R₅ café con zonas amarillas y R₆ totalmente color café con la pulpa seca, Garay et al. (2010).

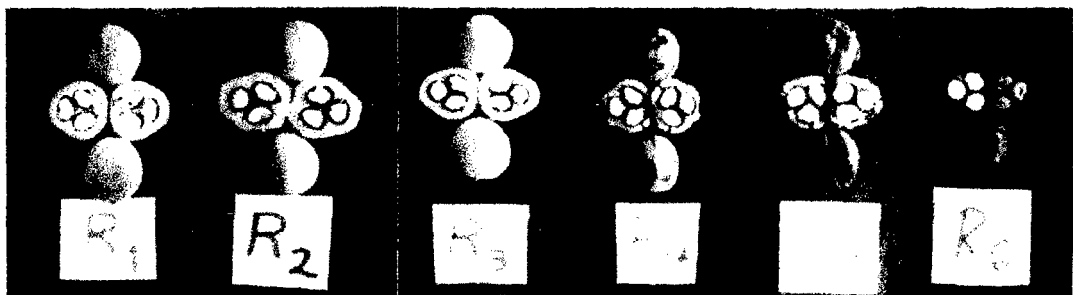


Figura 1: Estados de maduración fisiológica del Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L).

La humedad presente en las semillas para cada estado de maduración es: 51.07%, 49.94, 44.62%, 44.23%, 38.49% y 9.98% respectivamente, Garay et al. (2010).

El momento óptimo de cosecha para el Piñón blanco son los estados (R₃, R₄ y R₅), por obtener mayor contenido y mejores características de calidad del aceite, que se destinará para la elaboración de biodiesel, Vargas et al. (2010).

2.3. Control de calidad en aceites para Biodiesel.

La calidad del biodiesel tiene especial importancia en el desempeño y vida útil del motor, y es la materia prima uno de los factores más importantes.

Impurezas en el aceite. Comprenden todo el conjunto de sustancias insolubles en un disolvente volátil en las condiciones descritas, y que no hayan sido determinadas como "agua y materias volátiles". Del peso total obtenido de impurezas habrá que deducir, eventualmente, el peso de algunas de ellas, que, según el convenio entre las partes o según la costumbre, no deban ser consideradas como tales. El éter de petróleo deja insolubles: impurezas mecánicas (tierra, arena y residuos diversos); parte de ácidos oxidados libres y sus productos de polimerización, lactonas, jabones de cal, carbohidratos,

materias nitrogenadas, determinadas resinas, materias minerales, y no disuelve más que parcialmente los jabones alcalinos, Osorio (1977).

Humedad y materias volátiles. Mediante el método de estufa de aire se establecen las condiciones adecuadas para la determinación, en las materias grasas, del agua y de las materias volátiles, operando en las condiciones del ensayo. Es aplicable a las grasas animales y vegetales, con la excepción de los aceites secantes o semisecantes y los aceites del grupo del coco, Osorio (1977). El contenido de agua en un aceite es importante porque produce la hidrólisis de los triglicéridos, que se acelera por las altas temperaturas y presiones y una excesiva cantidad de agua. Durante la transesterificación, la presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y consumir el catalizador, reduciendo su eficiencia. La presencia de agua tiene un efecto aún más negativo que la de ácidos grasos libres, debe mantenerse por debajo de un 0.06%, Osorio (1977).

Cenizas. Las cenizas representan el residuo mineral de las materias grasas, previamente filtradas. Su porcentaje no debe añadirse al de las impurezas insolubles en un disolvente, para evitar que ciertos elementos sean considerados dos veces. Un valor alto de cenizas sulfatadas indica: presencia de sólidos abrasivos, presencia de metales (jabones, restos de catalizador); provoca cenizas en el motor que saturan filtros y desgaste de diversas partes del motor, Osorio (1977).

Densidad. Determina la masa de la unidad de volumen, expresada en gramos por centímetro cúbico, a una temperatura dada. La temperatura se debe controlar exactamente ya que la densidad de las materias grasas varía aproximadamente 0.00068 por grado. La temperatura de la determinación no diferirá de la referencia en más de 5 grados Celsius, Osorio (1977).

Viscosidad. Es la propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas. La viscosidad influye en el combustible obtenido. La alta viscosidad influye en la pulverización del

combustible inadecuadamente, por los sistemas de inyección que poseen los motores diesel de inyección directa modernos, Osorio (1977).

Punto de fusión. Las grasas y aceites naturales, como las mezclas de glicéridos y otras sustancias no tienen punto de fusión neta y definido. No presentan punto crítico de sólido a líquido; este paso lo realizan gradualmente a través de estados pastosos hasta el completamente líquido. Por tal razón, el punto de fusión de una grasa viene definido en este método por dos temperaturas: una, la inicial de ablandamiento deslizando, y otra, final de líquido perfectamente limpio, Osorio (1977).

Índice de acidez. Es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol, con una solución estándar de KOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis. Puede expresarse también como porcentaje del ácido graso que predomine en la grasa en cuestión. En caso del aceite de Piñón debe expresarse como porcentaje de ácido oleico, por ser el más abundante, Castillo (2006). La alta acidez interfiere en la transesterificación alcalina, produciendo jabones. Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel, Castillo (2006).

Índice de yodo. Es una medida del grado de insaturación de los componentes de una grasa. Un aceite totalmente saturado poseerá un $IY = 0$; mientras que a mayor cantidad de insaturaciones se fijará en ellos una cantidad proporcional de yodo, incrementándose este índice, Utilizándose por ello para comprobar la

pureza y la identidad de las grasas (el índice de yodo del ácido oleico es 90, del ácido linoleico es 181 y del ácido linolénico 274), Castillo (2006). El yodo por sí mismo no reacciona con los dobles enlaces. En su lugar se utilizan bromo o halogenados mixtos como ICl o IBr. Se expresa convencionalmente por el peso de yodo absorbido por cien partes en peso de la materia grasa. Un alto índice de yodo puede indicar menor punto de fusión y mejores propiedades de flujo en frío. Bajo índice de yodo indica mejor estabilidad a la oxidación y polimerización (menor riesgo de formación de sólidos), y mayor número de cetano (mejor calidad de combustión), Castilla (2006).

Índice de peróxido. Son los mili equivalentes de oxígeno activo contenidos en un kilogramo de la materia ensayada, calculados a partir del yodo liberado del yoduro potásico. Indica en que extensión ha experimentado el aceite la rancidez oxidativa. Los peróxidos son los productos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas, cualquiera sea su composición, Osorio (1977). Los aceites que contienen una proporción más elevada de ácidos grasos insaturados son más propensos a la oxidación que los que contienen cantidades más bajas. La velocidad de oxidación crece con un incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre), Castillo (2006).

Índice de saponificación (Índice de Koettstorfer). Es una medida aproximada del peso molecular promedio de los ácidos grasos. Se define como el "número de miligramos de KOH necesarios para saponificar 1 g de aceite completamente". Dado que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse, el índice de saponificación puede ser usado para estimar aproximadamente el peso molecular promedio del aceite utilizado, Castillo (2006).

2.4. Control de calidad de biodiesel.

Descripción del biodiesel. Los ésteres metílicos de ácidos grasos (FANE) denominados Biodiésel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo, Ciria (2003).

El Biodiésel puede mezclarse con gasóleo procedente del refino de petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de Biodiésel en la mezcla: **B100** en caso de utilizar sólo Biodiésel, u otras notaciones como **B5**, **B15**, **B30** o **B50**, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de Biodiésel en la mezcla, Ciria (2003).

Procesos industriales. En la actualidad existen diversos procesos industriales mediante los cuales se pueden obtener Biodiésel. Los más importantes son los siguientes:

1. **Proceso base-base.** Mediante el cual se utiliza como catalizador un hidróxido. Este hidróxido puede ser hidróxido de sodio (soda cáustica) o hidróxido de potasio (potasa cáustica), Araya (2009).
2. **Proceso ácido-base.** Este proceso consiste en hacer primero una esterificación ácida y luego seguir el proceso normal (base-base), se usa generalmente para aceites con alto índice de acidez, Araya (2009).
3. **Procesos supercríticos.** En este proceso ya no es necesario la presencia de catalizador, simplemente se hacen a presiones elevadas en las que el aceite y el alcohol reaccionan sin necesidad de que un agente externo, como el hidróxido, actúe en la reacción, Araya (2009).
4. **Procesos enzimáticos.** En la actualidad se están investigando algunas enzimas que puedan servir como aceleradores de la reacción aceite-alcohol. Este proceso no se usa en la actualidad debido a su alto coste, el cual impide que se produzca Biodiésel en grandes cantidades, Araya (2009).
5. **Método de reacción Ultrasónica.** En el método reacción ultrasónica, las ondas ultrasónicas causan que la mezcla produzca y colapse burbujas constantemente. Esta cavitación proporciona simultáneamente la mezcla y el

calor necesarios para llevar a cabo el proceso de transesterificación. Así, utilizando un reactor ultrasónico para la producción del biodiésel, se reduce drásticamente el tiempo, temperatura y energía necesaria para la reacción. Y no sólo reduce el tiempo de proceso sino también de separación. De ahí que el proceso de transesterificación puede correr en línea en lugar de utilizar el lento método de procesamiento por lotes. Los dispositivos ultrasónicos de escala industrial permiten el procesamiento de varios miles de barriles por día. Especialmente durante el último año el uso del equipo ultrasónico aumentaba significativamente a causa de sus ventajas económicas, Araya (2009).

Reacción de síntesis. El proceso de transesterificación consiste en combinar, el aceite (normalmente aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, y deja como residuo de valor añadido propanotriol (glicerina) que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras, como se muestra en la figura 02, Osorio (1977).

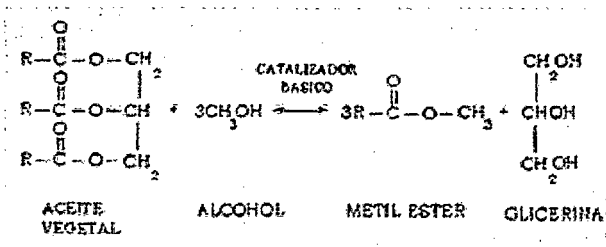


Figura 2: Reacción de Transesterificación.

Características del biodiesel (especificaciones de calidad). En el cuadro 01 se presentan las especificaciones del biodiesel B100, para cualesquier fuente (materia grasa).

Cuadro 1. Especificaciones del Biodiesel.

Propiedad	Unidad	Límites		Método de Ensayo
		Mínimo	Máximo	
Contenido en éster	%(m/m)	96,5	-	EN 14103

Densidad a 15°C	<i>Kg/m³</i>	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C	<i>mm²/g</i>	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679
Contenido de azufre	<i>mg/Kg</i>	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO20884
Resíduo de carbón (en 10% de residuo destilado)	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Índice de cetano		51,0		EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
<u>Contaminación</u> total	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosión de la tira de cobre (3h a 50°C)	Clasificación	Clase 1		EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación 110°C	Horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Índice de yodo	g I/100g		140	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoléico	% (m/m)		12,0	EN 14103
Ésteres de metilo poli- insaturados	% (m/m)		1	
(> = a 4 dobles enlaces)				
Contenido de metanol	% (m/m)		0,20	EN 14110
Contenido en monoglicéidos	% (m/m)		0,80	EN 14105
Contenido en diglicéridos	% (m/m)		0,20	EN 14105
Contenido en triglicéridos	% (m/m)		0,20	EN 14105
Glicerol libre	% (m/m)		0,02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)		0,25	EN 14105
Metales del grupo I (Na+K)	mg/kg		5,0	EN 14108 EN 14109

Metales del grupo II (Ca+Mg)	mg/kg	5,0	prEN 14538
Contenido de fósforo	mg/kg	10,0	EN 14107

Fuente: Wearcheckiberica. Boletín Mensual, septiembre 2004.

Control de calidad de Biodiesel. Las propiedades de un diesel y un biodiesel comerciales dependen tanto del proceso de fabricación como de la naturaleza de los lípidos a partir de los cuales se ha producido en el caso del último. El biodiesel en función de la naturaleza de la fuente, animal o vegetal, proporcionará unas características particulares al nuevo combustible:

Punto de Inflamación. Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención en el caso de biodiesel, Ciria (2003).

Viscosidad: debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por la otra parte también se limita la viscosidad máxima por consideración de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección, Ciria (2003).

Densidad: da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor, Ciria (2003).

Cenizas sulfatadas: los materiales que forman cenizas en un biodiesel se pueden presentar de tres formas.

- ✓ Sólidos abrasivos.
- ✓ Jabones metálicos solubles.
- ✓ Catalizadores no eliminados en el proceso.

En el caso del diesel, normalmente solo aparecen los primeros o gomas solubles.

Tanto los sólidos abrasivos como los catalizadores no eliminados favorecen al desgaste del inyector, bomba de inyección, pistón y anillos, además de contribuir a la formación de depósitos en el motor. Los jabones metálicos solubles tienen un efecto menor en el desgaste pero pueden afectar más a la colmatación de filtros y depósitos en el motor, Ciria (2003).

Azufre: contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites medio ambientales, Ciria (2003).

Corrosión a la lámina de cobre: mediante la comprobación del desgaste de una lámina de cobre se puede observar si existen en el sistema compuestos corrosivos y/o presencia de ácidos que puedan atacar al cobre o/a aleaciones de cobre como el bronce que forman parte del sistema de combustible, Ciria (2003).

Número de cetano: es una medida de la cantidad de ignición de un combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. El número de cetano depende del diseño y tamaño del motor, de las variaciones de la carga, velocidad y condiciones de arranque y atmosféricas. Un bajo número de cetano conlleva a ruidos en el motor, prolongando el retraso de la ignición y aumentando el peso molecular de las emisiones, Ciria (2003).

Índice de yodo: indica la tendencia a la oxidación de un biodiesel por que da idea del grado de instauración que posee sus esteres, Ciria (2003).

Punto de nube: indica la temperatura a la cual empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, materia in-saponificable, etc.). Es una medida muy importante a tener en cuenta cuando se usa el motor en climas fríos. El valor debe ser definido por usuario, ya que depende del clima en el cual el motor se utilice, Ciria (2003).

Agua y sedimentos: el agua se puede formar por condensación en el tanque de almacenamiento. La presencia de agua y sólidos de desgaste normalmente pueden colmatar filtros y darles al combustible unas propiedades de lubricidad menores. El biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel. El agua puede provocar 2 problemas en el motor.

- ✓ Corrosión en los componentes del motor generalmente herrumbre. El agua se acidifica y acaba atacando a los tanques de almacenamiento.
- ✓ Contribuye al crecimiento de microorganismos (fungi, bacterias,...). que forman lodos y limos que pueden colmatar los filtros. Además, algunos de estos microorganismos pueden convertir el azufre que posea el combustible en ácido sulfúrico, que corroe la superficie metálica del tanque.

El agua puede presentar en el tanque de dos formas:

- ✓ Disuelta en el combustible. La cantidad de agua depende de la solubilidad de esta en el biodiesel.
- ✓ Separada de la fase de combustible en forma libre. La cantidad de este depende de cómo se manipule y transporte el combustible.

Los sedimentos pueden ser debidos principalmente a un mal proceso de purificación del combustible o contaminación. Afecta principalmente a la temperatura de cristalización y al Número de Cetano, Ciria (2003).

Residuos carbonosos: da una idea del combustible a formar residuos carbonosos. Se aproxima a la tendencia del motor a formar depósito, Ciria (2003).

Destilación: indica la temperatura máxima a la que se debe evaporar el combustible a unas condiciones de presión y temperaturas dadas.

- ✓ El biodiesel a la temperatura de 360°C tiene que estar el 90% destilado, según la norma ASTM D1160.
- ✓ El diesel a la temperatura de 360°C tiene que estar el 95% destilado, según la norma ASTM D86, Ciria (2003).

Número de ácido: determina el nivel de ácidos grasos, ó generados por degradación, que se presentan en el combustible. Si posee un alto grado de

acidez se formaran una cantidad importante de depósitos y también se producirá mayor corrosión en el sistema, Ciria (2003).

Contenido en metales (Na, K, P,...) y ácidos grasos libres: contribuye al aumento del residuo carbonoso de manera notable y también a las cenizas, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados. Además, también se pueden formar jabones que colmatan los filtros del combustible, Ciria (2003).

Lubricidad: es la cualidad de un líquido para proporcionar una lubricación adecuada para prevenir el desgaste entre dos superficies en movimiento. Los combustibles con un contenido bajo en azufre o baja viscosidad tienden a tener una lubricidad menor, Ciria (2003).

Glicerina libre: determina el nivel de glicerina no enlazado presente en el biodiesel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biodiesel. Niveles altos pueden causar problemas de depósitos en el inyector, así como colmatación de filtros. Puede dañar los sistemas de inyección debido a los compuestos inorgánicos y jabones que se acumulan en la glicerina. Si la cantidad de glicerina es superior al 0.5% esta puede afectar al contenido del residuo carbonoso, Ciria (2003).

Glicerina total: determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significa que se ha producido un alto grado de conversión en el aceite o grasa, y se han formado gran cantidad de monoésteres. Niveles altos de mono, di y triglicéridos pueden provocar la colmatación de los filtros, depósitos carbonosos en los inyectores y pueden afectar adversamente a las propiedades a bajas temperatura. Estos son debido a que al poseer temperaturas de ebullición superiores provocan que la combustión sea bastante peor. Además aumentan la viscosidad del biodiesel, Ciria (2003).

Contenido en alcohol: puede provocar problemas de lubricidad y en el Número de Cetano desde el punto de vista de la seguridad el punto de inflamación

disminuye por otro lado junto a la presencia del alcohol puede venir asociada glicerina disuelta en este con los consiguientes problemas antes mencionados, Ciria (2003).

Estabilidad a la oxidación: se determina la vida de almacenamiento y la degradación potencial de un combustible durante su almacenamiento. La oxidación de un combustible suele venir acompañada de la formación de gomas solubles e insolubles que pueden actuar de la siguiente manera:

- ✓ Gomas insolubles. Problemas de colmatación de filtros.
- ✓ Gomas solubles. Formación de depósitos en la punta del inyector y fallos en las boquillas de los inyectores.

Además dicha estabilidad a la oxidación se puede ver alterada por los diversos contaminantes que pueden estar presentes en el biodiesel, Ciria (2003).

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Lugar y fecha de ejecución.

El presente trabajo de investigación se realizó en el campo de investigación del cultivo de Piñón Blanco, en el Laboratorio de Postcosecha y Agroindustrias, y en otras instalaciones de la Estación Experimental Agraria "El Porvenir", Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en el laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto.

3.2. Materiales y reactivos.

3.2.1. Materiales de laboratorio.

- Pipetas de 1.00 ml, 5.00 ml y 10.00 ml.
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml y 300 ml.
- Matraz Kitasato de 1000 ml.
- Vasos de precipitación de 300 ml, 500 ml y 800 ml.
- Probetas de 50 ml, 100 ml y 500 ml.
- Soporte Universal.
- Placas petri de 2.5 cm y 9.0 cm.
- Cisoles de 15 ml y 30 ml.
- Papel filtro (WHATMAN Nro. 40 de 125 mm de diámetro).
- Balones de 250 ml.
- Mortero (Haldenwenger 55-6a).
- Mazo (Cooss 15).
- Vernier (KAMASA de 20 cm).
- Bureta de 50 ml.
- Gotero de 50 ml.
- Embudos de Plástico.
- Parafilm 4 IN. * 125 FT.
- Papel aluminio (BUDGET BUY 25 YD * 12 IN).

- Papel toalla.
- Guantes de Látex.
- Piseta de plástico de 500 ml.
- Espátula de acero inoxidable (STAINLESS PAKISTAN).
- Fiolas de 100 ml, 500 ml, 1000 ml y 2000 ml.
- Embudo de porcelana.
- Pinzas de metal.
- Dispensador de pipetas (BRAND macro).
- Refrigerantes de vidrio.
- Picnómetro de 25 ml (BRAND).

3.2.2. Reactivos de laboratorio.

- Alcohol neutro.
- Solución alcohólica de Fenolftaleína al 1%.
- Solución de KOH 0.1 N.
- Solución alcohólica de KOH 0.5 N.
- Cloroformo ($CHCl_3$).
- Ácido acético glacial ($C_2H_4O_2$).
- Solución saturada de ioduro de potasio.
- Solución de ioduro de potasio al 10%.
- Solución de tiosulfato de sodio, ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$), 0.002 N y 0.1 N.
- Solución de almidón al 1%.
- Reactivo de Wij's.
- Tetracloruro de carbono.
- Solución de ácido clorhídrico HCL 0.5 N.
- Éter de petróleo.
- Cloruro de litio ($LiCl$).
- Acetato de potasio ($KC_2H_3O_2$).
- Cloruro de magnesio ($MgCl_2$).
- Dicromato de sodio ($Na_2Cr_2O_7$).
- Nitrato de sodio ($NaNO_3$).
- Cloruro de sodio ($NaCl$).
- Cloruro de potasio (KCl).

- Cloruro de Bario ($BaCl_2$).
- Nitrato de potasio (KNO_3).
- Alcohol etílico 96%.

3.2.3. Equipos del laboratorio.

- Balanza analítica (METTLER AS 50, capacidad 25 g, mínimo 0.0001 g.).
- Balanza analítica (JW – 500, capacidad 500 g, mínimo 0.01 g.).
- Cronómetro digital (CASIO DQ-961).
- Estufa digital (BINDER, temperatura nominal 300°C, 1.20 KW).
- Estufa (MEMMERT, temperatura nominal 300°C, 1.20 KW).
- Horno mufla (THERMO SCIENTIFIC, modelo PB1410M, 1520 W).
- Termómetro digital (OAKTON, modelo TEMP10K).
- Titulador automático (BRAND, capacidad 25 ml).
- Equipo SOXHLET de 6 unidades (THERMO SCIENTIFIC).
- Cocina – agitador magnético (VELP SCIENTIFICA).
- Viscosímetro capilar (VWR INTERNATIONAL, número 2).
- Campanas desecadoras.
- Psicrómetro digital (JENWAY 5105).
- Prensa de tornillo sin fin marca KEK, modelo P0020, de capacidad (20 Kg/hora), la velocidad de trabajo es (22 RPM)

3.2.4. Materiales utilizados en la construcción de los secadores solares (Plataforma y Parihuela).

- GPS.
- Estacas.
- Hilo de plástico (rafia).
- Martillos.
- Machetes.
- Cinta métrica.
- Plano de diseño.
- Cavadoras.

- Postes de madera de la especie Quinilla de 3 pulg * 3 pulg.
- Alambre de amarre.
- Nivel.
- Clavos de 3 pulg.
- Listones de madera.
- Maquina circular.
- Clavos de 2 pulg, 2^{1/2} pulg, 3 pulg, y 3^{1/2} pulg y 4 pulg.
- Sierra mecánica.
- Tablas de 1^{1/2} pulg. * 20 cm * 2.00 m.
- Manta negra de polipropileno (semejante al material de los sacos comunes).
- Clavos de 1 pulg y 1^{1/2} pulg.
- Malla metálica de 1/8.
- Clavos de 1 pulg, 1^{1/2} pulg y 2 pulg.
- Cola sintética para madera.
- Mantas plásticas de polietileno de baja densidad 3.5 m * 12.0 m, y translúcida.
- Trozos de bambú.
- Cintas de cámara de llantas.
- Tijera.

3.3. Metodología.

3.3.1. Obtención de la materia prima “semillas de Piñón blanco”.

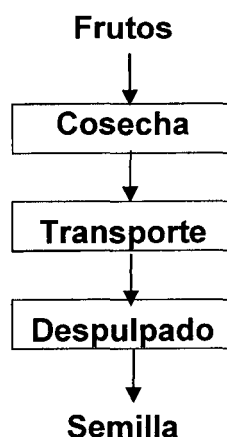


Figura 3: Diagrama de flujo para obtener la materia prima.

Frutos: en estado de maduración (R₃, R₄ y R₅), figura 01, recomendada por Vargas, (2010).

Cosecha: una vez en el campo de producción con los materiales necesarios, tales como; costales, rafia, etc. Se procedió a dar inicio a esta actividad seleccionando únicamente los frutos indicados en el apartado anterior, cogiéndolas manualmente y homogenizando en un solo costal.

Transporte: con los costales repletos de frutos se aseguro con la rafia, y se cargo a la camioneta en la que se transportó desde el campo hasta el ambiente donde se desarrollo el despulpado.

Despulpado: en un ambiente cercano al lugar donde se realizara el experimento, separamos las semillas de la pulpa manualmente y se colocó en otro recipiente.

Semilla: las semilla finalmente obtenidos se homogenizan en un solo recipiente y se peso.

3.3.2. Influencia de la temperatura y del área de secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.).

Procedimiento experimental. Las semillas se acondicionaron en los respectivos modelos de bandejas, diseñados a escala, figura 04, para realizar el proceso de secado, posteriormente obtenido las condiciones de equilibrio, se procedió a extraer el aceite en la prensa de tornillo sin fin, el aceite obtenido se filtró y se realizaron los análisis físico-químicos.

Determinación de la curva básica de secado. La metodología utilizada es la descrita por Geankoplis (1998). Las semillas se acondicionaron en recipientes confeccionados con madera como se muestra en la figura 04, los lados y la base con madera, para simular el modelo de secador solar plataforma, con simple

área de secado, y los lados con madera y la base con malla, para simular el modelo parihuela con doble área de secado, las dimensiones fueron 22.5 cm * 15.3 cm * 2.4 cm, siendo suficiente para acondicionar 370 g de semillas. Se condujeron a una estufa regulada a las temperaturas de (35°C, 45°C, 55°C y 65°C).

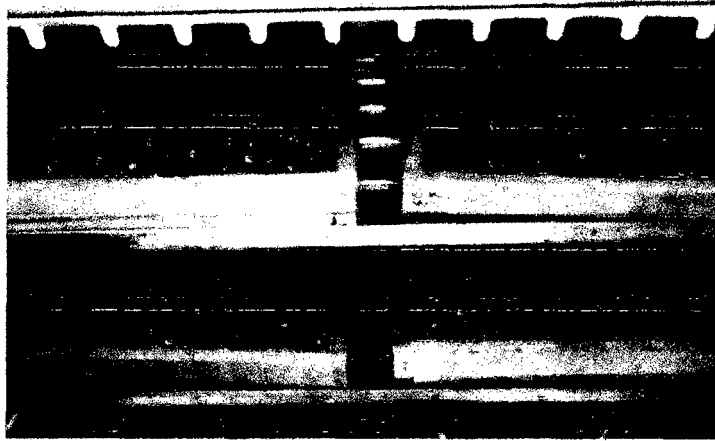


Figura 4: Secado convectivo, en estufa eléctrica, de las semillas de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L).

El control del peso, se realizó en intervalos pre-establecidos de 15 minutos para las 4 primeras lecturas, 30 minutos las siguientes, para temperaturas de 65°C y 55°C. Para temperaturas de 45°C y 35 °C las últimas lecturas se realizaron en intervalos de 1 y 2 horas dependiendo de la variación del peso. Para esto se utilizó una balanza analítica marca JW modelo JW-500 con precisión de 0.01 gramos.

La humedad inicial de las semillas fue determinada según el método de secado en estufa a 105°C por 24 horas (AOAC, 1979).

Para obtener la curva básica de secado se calcula la humedad en base seca según la ecuación 01:

$$Y_t = \frac{P_t - P_s}{P_s} \quad (\text{Ec. 01})$$

Donde:

Y_t : Humedad en base seca ($Kg H_2O/Kg$ materia seca), para el tiempo (t).

P_t : Peso de las semillas en el tiempo (t).

P_s : Peso de las semillas totalmente secas.

Con los datos de tiempo (t) y humedad en base seca (Y_t) se grafica la curva básica de secado, como se muestra en la figura 05.

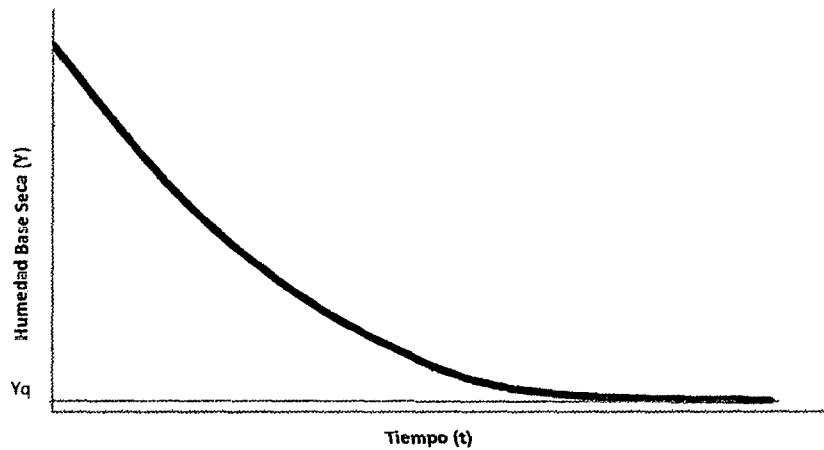


Figura 5: Curva básica de secado.

Determinación de la curva de régimen de secado. Después de haberse establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad de equilibrio (Y_q). Con él, se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre (X) para cada tiempo de lectura, ecuación 02.

$$X = Y_t - Y_q \quad (\text{Ec. 02})$$

Se procede a calcular la velocidad de secado. Se calcula la pérdida de humedad (ΔX) por cada intervalo de tiempo (Δt), ecuaciones 03 y 04.

$$R = -\frac{P_s}{A} * \frac{\Delta X}{\Delta t}, \text{ para simple área de secado.} \quad (\text{Ec. 03})$$

$$R = -\frac{P_s}{2 * A} * \frac{\Delta X}{\Delta t}, \text{ para doble área de secado.} \quad (\text{Ec. 04})$$

Donde:

A : Área de secado.

El valor de (R) se grafica con el promedio de la humedad libre en el mismo intervalo del que se calculo la velocidad de secado y de esta forma de obtiene la curva de régimen de secado, como se muestra en la figura 06.

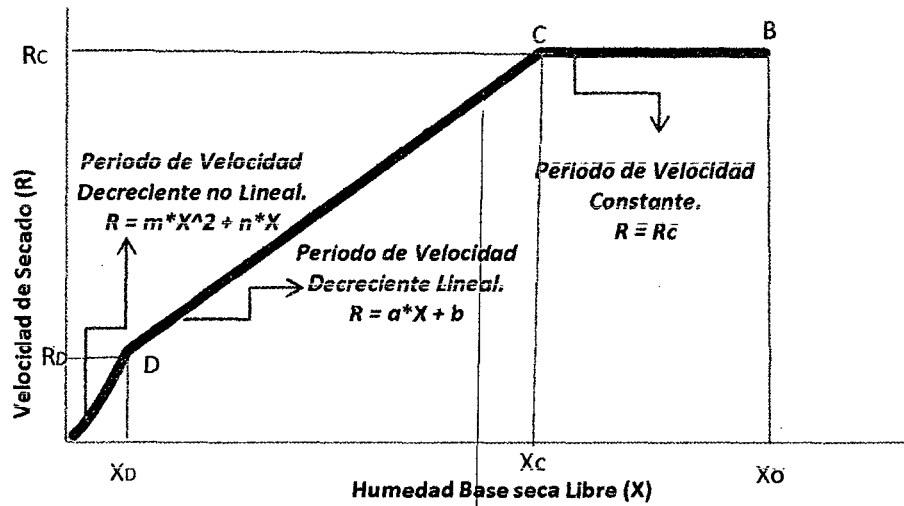


Figura 6: Curva de régimen de secado y los modelos matemáticos.

En la figura 06 se presenta los periodos de secado, también las ecuaciones que describen cada periodo, Geankoplis (1998), para el primer periodo se observa es una función constante ante la variación de la humedad, para el segundo periodo es una función decreciente lineal y para el tercer periodo es una función Polinómica de segundo grado que pasa por la intersección de los ejes.

Ajustando cada periodo de secado a las ecuaciones descritas en la figura 06, se obtienen los valores de las constantes (R_C, a, b, m y n) que describen cada periodo de secado. Con los cuales se pueden calcular los valores de los parámetros (X_C, X_D y t_T), con las ecuaciones 05, 06 y 07.

$$X_C = \frac{R_C - b}{a} \tag{Ec. 05}$$

$$X_D = \frac{\sqrt{(n-a)^2 + 4 \cdot m \cdot b} - (n-a)}{2 \cdot m} \tag{Ec. 06}$$

$$t = \frac{P_S}{A} \left[\frac{1}{R_C} (X_0 - X_C) - \frac{1}{a} * \ln \left| \frac{a * X_D + b}{a * X_C + b} \right| - \frac{1}{n} * \ln \left| \frac{X(m * X_D + n)}{X_D(m * X + n)} \right| \right] \quad (\text{Ec. 07})$$

Análisis de los datos experimentales. El análisis de varianza de los datos se desarrolló bajo un “Experimento bifactorial (temperatura y área de secado), con arreglo combinatorio (4*2) y diseño completamente al azar con 4 repeticiones”, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, la confiabilidad de los datos fue evaluada mediante el coeficiente de variación (CV). Así mismo se realizaron pruebas comparativas de medias de Tuckey en función a la temperatura y área de secado. Para esto se utilizó el paquete estadístico (SAS System for Windows).

Teniendo como variables respuestas los parámetros de secado (Y_q, R_C, X_C, X_D y t_T), el contenido de grasa total de la almendra y los análisis físico-químicos del aceite, obtenido por prensado mecánico, (índice de acidez, Peróxido, Yodo, Saponificación, densidad a 15°C, viscosidad a 40°C, humedad y cenizas totales).

3.3.3. Influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.).

Procedimiento experimental. Las semillas se acondicionaron en los respectivos modelos de secadores solares, figura 13.

El control de la humedad relativa, así como, de la temperatura y la humedad de las semillas, fue en intervalos pre-establecidos de 30 minutos las 4 primeras lecturas, 60 minutos las siguientes. Para esto se utilizó una balanza analítica marca JW modelo JW-500 con precisión de 0.01 gramos y un psicrómetro digital.

La humedad de las semillas fue determinada según el método de secado en estufa a 105°C por 24 horas (AOAC, 1979). Todos los muestreos se realizaron por duplicado. Alcanzada la humedad de extracción de aceite en la prensa de tornillo sin fin (6%), se terminaba el proceso de secado solar.

Construcción de los secadores solares (Plataforma y Parihuela). Los secadores se construyeron en un terreno total de 180 m², ubicado en la latitud sur 06° 35' 05" y longitud oeste 76° 20' 05" a 275 msnm, E.E.A. El Porvenir-INIA distrito de Juan Guerra, provincia de San Martín, Región San Martín, figura 13.

El terreno seleccionado cuenta con las condiciones técnicas, económicas y de seguridad, necesarias para poder desarrollar los estudios planteados, pues, está expuesta a los rayos solares 95% del día, tiene baja pendiente; además, cuenta con vigilancia.

Trazado del terreno.

- Con el equipo GPS se procedió a orientarse, de tal manera que el secador debe estar ubicado de sur a norte, que es la dirección que en general recorren los vientos y además esta orientación permite optimizar el aprovechamiento de la energía solar, distribuyéndose uniformemente, figura 07.
- Con la cinta métrica se procedió a medir las dimensiones según el plano de diseño y con la ayuda de las estacas y la rafia se delimitó el terreno definiéndose también los puntos donde se tendrá que excavar para sembrar los postes.

Nivelación y siembra de postes.

- Se excavó los huecos donde se sembraron los postes.
- Con la ayuda del nivel, la cinta métrica y la rafia, se procedió a sembrar los postes de tal manera que quedaran alineadas y en su debido lugar conforme al plano de diseño.

Construcción de la estructura.

- Con la ayuda de la máquina circular se acondicionó los listones a las medidas que se requerían.
- Se procedió a clavar los listones en los postes conforme a las especificaciones del modelo de secador, figura 08.

Construcción de la Plataforma.

- Con la ayuda de la sierra mecánica se procedió a cortar las tablas al tamaño deseado.
- Se fijaron las tablas una por una a la estructura del secador, con la ayuda de los clavos de 1^{1/2} pulg, figura 09.
- La manta plástica negra de polipropileno se fijó en las tablas, con los clavos de 1 pulg, realizando cortes en el caso de ser necesarios.

Construcción de las Parihuelas.

- Con la ayuda de la máquina circular se obtuvieron tablillas de 6cm * 90cm, 6cm * 98cm y de 3cm * 88cm.
- Las uniones fueron posibles con los clavos y reforzados con la cola sintética.
- Las mallas fueron colocadas y aseguradas con clavos de 1 pulg y como segundo aseguramiento y al mismo tiempo como corredera se colocó filamentos de madera en los borde, figura 10.

Instalación de las mantas.

- Se partieron los trozos de bambú en hebras de tal manera que al ser colocados en la parte superior de la estructura del secador formen una curva en el cual se pueda acondicionar la manta plástica translúcida.
- Luego de colocar las hebras de bambú en intervalos de 20 cm de espaciamento, se procedió a colocar la manta de plástico translúcida, polietileno de baja densidad, asegurándolas con cintas de cámara de llantas.



Figura 7: Orientación con el equipo GPS, para la construcción de los módulos de secador solar.



Figura 8: Armado de la estructura de los modelos de secador solar.

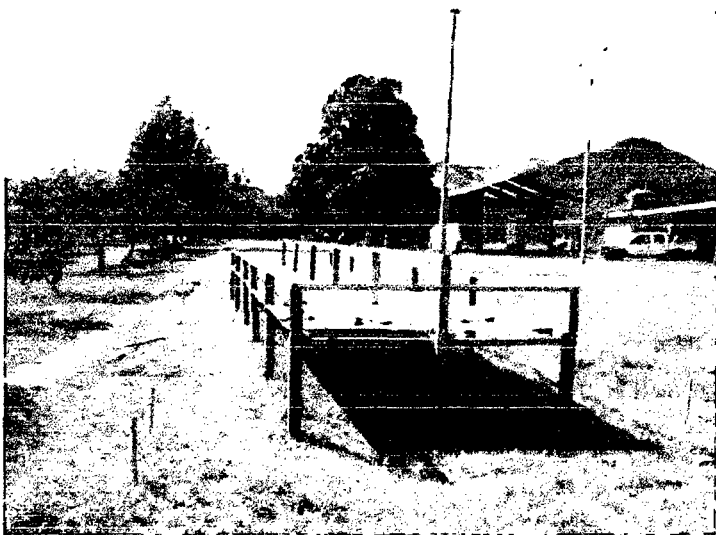


Figura 9: Construcción de la base del modelo de secador solar de plataforma.



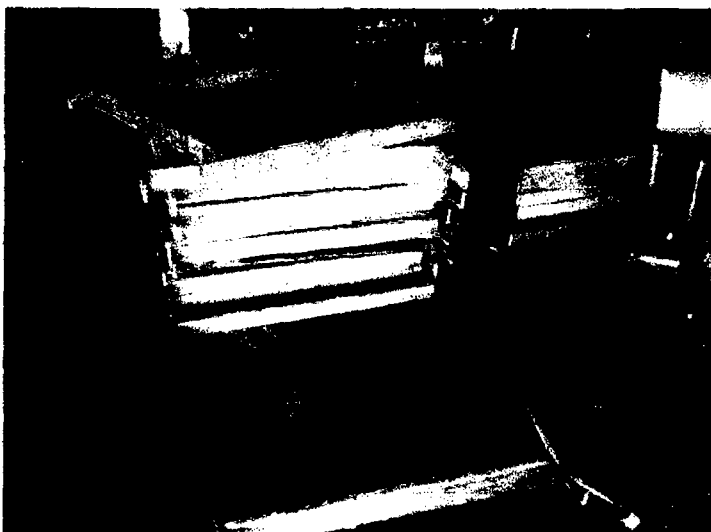


Figura 10: Construcción de las parihuelas del modelo de secador solar de parihuela.

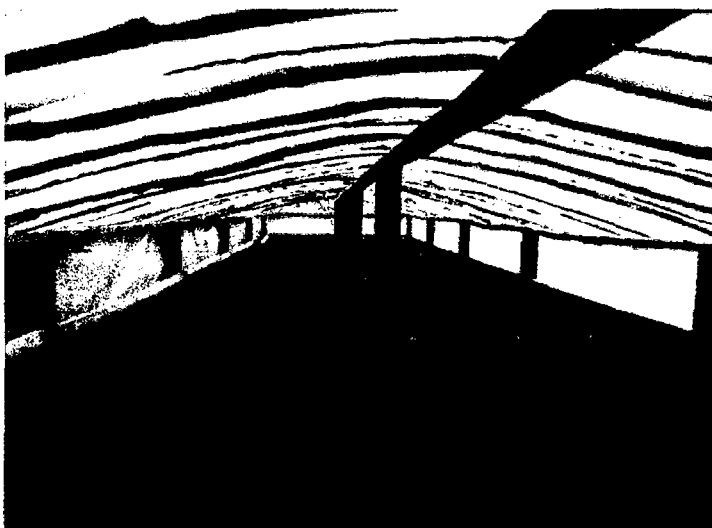


Figura 11: Interior del modelo de secador solar de Plataforma.

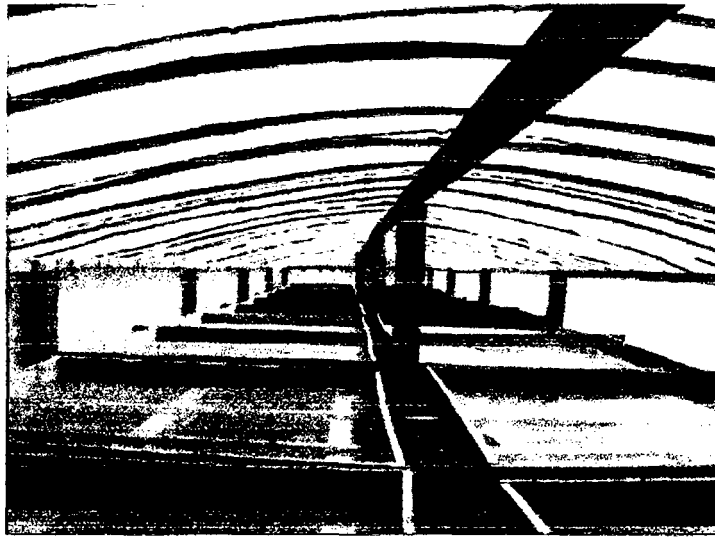


Figura 12: Interior del modelo de secador solar de Parihuela.



Figura 13: Modelos de secador solar, Plataforma derecha y Parihuela izquierda, terminadas.

Modelado de los datos experimentales de secado solar. Los datos experimentales de secado solar se ajustaron a los modelos matemáticos de Page (Ecuación 08), Zhang y Litchfield (1991); Guarte (1996) y Page modificado (Ecuación 09), White et al. (1981); Yaldiz et al. (2001), el grado de ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación (r^2) y por el porcentaje de error relativo (%E). Para esto se utilizó el paquete estadístico (Microcal Origin 5.0).

$$Y/Y_o = e^{(-k \cdot t^n)} \quad (\text{Ec. 08})$$

$$Y/Y_0 = e^{(-k*t)^n} \quad (\text{Ec. 09})$$

Análisis de Varianza de los datos experimentales. El análisis de varianza de todos los datos de campo de esta parte de la investigación se desarrolló bajo un “diseño en bloques completamente al azar con tres repeticiones” teniendo como tratamientos los modelos de secador solar y como bloques el número de cosecha, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, la confiabilidad de los datos fue evaluada mediante el coeficiente de variación (*CV*). Así mismo se realizaron pruebas comparativas de medias de Tuckey en función del modelo de secador solar.

Las variables respuestas fueron, el contenido de grasa total de la almendra y los análisis físico-químicos del aceite, obtenido por prensado mecánico, (índice de acidez, Peróxido, Yodo, Saponificación, densidad a 15°C, viscosidad a 40°C, humedad, impurezas, punto de humo y cenizas totales).

Las razones por las cuales se decidió emplear el diseño en bloques en el experimento son; por la influencia que causó el efecto del lugar de cosecha, pues, debido a la poca disponibilidad de la materia prima (frutos de Piñón blanco) se cosechó en 2 zonas distintas, pero del mismo ecotipo. La primera y tercera cosecha se realizaron en el sector conocido como Totorillayco, a unos 5 kilómetros al oeste del distrito de Juan Guerra, este campo pertenece a la empresa AGROBIOFUELS PERÚ S.A.C. La segunda cosecha se realizó en los campos experimentales de la E.E.A. El Porvenir – INIA – Juan Guerra.

3.3.4. Determinación de parámetros de almacenamiento óptimo de las semillas de Piñón Blanco.

Procedimiento experimental. Las semillas con 40% de humedad inicial fueron secadas en estufa eléctrica, a 60°C, hasta alcanzar humedades de 4%, 14% y 24%, en base húmeda. Para determinar las curvas de isotermas se utilizó el método estático gravimétrico de soluciones salinas saturadas, aproximadamente

2 g de muestra se pesaron por cada unidad experimental, se colocaron en recipientes cerrados herméticamente, exponiéndolas a atmósferas de humedad relativa conocida y constante, generadas por soluciones salinas saturadas de Cloruro de Litio (LiCl), Acetato de Potasio (KC₂H₃O₂), Cloruro de Magnesio (MgCl₂), Dicromato de Sodio (Na₂Cr₂O₇), Nitrato de Sodio (NaNO₃), Cloruro de Sodio (NaCl), Cloruro de Potasio (KCl), Cloruro de Bario (BaCl₂) y Nitrato de Potasio (KNO₃). Los recipientes se colocaron en ambientes con temperatura controlada de 15°C, 25°C y 35°C, y fueron pesados periódicamente hasta alcanzar peso constante; a los recipientes con humedad relativa (HR) mayor a 75% se les adicionó Thymol, para evitar el desarrollo microbiano. Cada isoterma fue fijada por cuadruplicado, y el valor que se reporta es el promedio; el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio varió entre 4 a 5 semanas. La humedad de equilibrio se determinó en estufa a 105°C por 24 horas, (A.O.A.C., 1990).

Modelado de la isoterma de adsorción. Los datos experimentales se modelaron con las ecuaciones de: Guggenheim, Anderson y de Boer, Van den Berg et al., (1981), BET, Brunauer et al., (1938), Oswin, Henderson y Peleg, Iglesias & Chirife, (1982), las que se presentan en el cuadro 02.

Para el ajuste a los modelos y la evaluación de los parámetros se utilizó regresión no lineal del paquete estadístico del software MICROCAL ORIGIN 5.0. La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de correlación lineal (R²), el que debe ser superior a 0.94 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error medio relativo (%E) (Ecuación 10) parámetro estadístico ampliamente utilizado en isotermas.

$$\%E = \frac{100}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde: X_{ei} es el contenido de humedad experimental (g agua/g m.s.); X_{ci} es el contenido de humedad calculada a partir de cada modelo (g agua/g m.s.); y n es el número de observaciones.

Cuadro 2. Modelos a utilizar en el ajuste de los datos experimentales.

Modelo	Ecuación	Parámetros
GAB	$X_w = \frac{X_m * C * K * a_w}{(1 - K * a_w) * (1 + (C - 1) * K * a_w)}$	<p>X_m, es la humedad del producto correspondiente a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua.</p> <p>C, es la constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa.</p> <p>K, es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.</p>
BET	$X_w = \frac{X_m * C * a_w}{(1 - a_w) * (1 + (C - 1) * a_w)}$	<p>X_m, es la humedad del producto correspondiente a una capa monomolecular de agua adsorbida.</p> <p>C, constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción.</p>
OSWIN	$X_w = A * \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$	A y B son constantes del modelo y características para cada alimento.
HENDERSON	$X_w = \left(\frac{-LN(1 - a_w)}{A} \right)^{1/B}$	A y B son constantes del modelo y características para cada alimento.
PELEG	$X_w = K_1 * (a_w)^{n_1} + K_2 * (a_w)^{n_2}$	K_1 , n_1 , K_2 y n_2 ; parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la humedad de monocapa. El valor de la humedad de monocapa se determinó con el modelo matemático que mejor se ajustó a los datos experimentales (GAB), y se analizó la influencia de los factores de estudio en el valor de este parámetro mediante un experimento bifactorial (temperatura – humedad inicial de la semilla) con arreglo combinatorio (3*3) y diseño completamente al azar con 4 repeticiones, a nivel de significancia de 0.05, y finalmente se realizó la prueba de Tuckey.

3.3.5. Análisis biométrico de las semillas.

Se muestreó 25 semillas, primero con la ayuda de una balanza analítica, marca METTLER, modelo AE50, de sensibilidad 0.0001 gramos, se pesó la semilla, con la ayuda de un vernier, se midió el largo, diámetro y espesor de la semilla. Se retiró la testa de la semilla para pesar tanto la testa como la almendra, posteriormente se midió el largo, diámetro y espesor de la almendra. Este mismo procedimiento se realizó para las 25 semillas muestreadas.

3.3.6. Determinación del contenido total de grasas.

Método de extracción Soxhlet, AOAC (1990). Desecamos los balones, en la estufa a 105°C. Enfriamos en una campana de desecación. Pesamos el balón. Retiramos la testa de las semillas y trituramos con la ayuda de un mortero. Empacamos cuidadosamente en un papel filtro 5 gramos de la almendra triturada. Colocamos el paquete en el cuerpo del Soxhlet, agregamos 200 mil del disolvente (Éter de Petróleo). Conectamos la fuente de calor y la de enfriamiento. Controlamos 3 horas y retiramos el balón, previamente recuperamos el disolvente, colocamos el balón en la estufa a 100°C por 1 hora, para retirar el disolvente, enfriamos el balón en la campana y pesamos, el contenido de grasa total se calcula con la ecuación 11.

$$\% \text{ Grasa Total} = \frac{P'' - P'}{P} * 100 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

P'' : Peso del balón con la grasa extraída, en gramos.

P' : Peso del balón vacío, en gramos.

P : Peso de la muestra, en gramos.

3.3.7. Extracción de aceite en la prensa de tornillo sin fin.

Se utilizó una prensa de tornillo sin fin marca (KEK), modelo (P0020), de capacidad (20 Kg/hora), la velocidad de trabajo fue (22 RPM). Lavamos con solución de NaOH al 10%. Ensamblamos las piezas. Encendimos el equipo por un tiempo de 15 minutos para permitir que el sistema se caliente, pasado este tiempo alimentamos las semillas, con humedad entre 6% a 8%, por la tolva y recogemos el aceite en vasos de precipitación previamente taradas y rotuladas, paralelo a esta operación recogimos también la torta en un costal, figura 14.

3.3.8. Análisis físico-químico del aceite de Piñón blanco.

Índice de acidez. Se utilizó el método AOCS (1997). Se pesó aproximadamente 5 g. ± 0.05 del aceite y se disolvió en 50 ml de alcohol etílico previamente neutralizado, se agitó vigorosamente hasta disolver totalmente el aceite, se agregó 2 gotas de fenolftaleína, posteriormente se tituló con solución de KOH 0.1 N hasta viraje a color grosella del indicador.

$$IA = \frac{V \cdot N \cdot PM_{KOH}}{m} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

IA : Índice de acidez del aceite ($mg\ KOH/g\ aceite$)

V : volumen de solución de KOH 0.1 N empleada (ml).

N : normalidad de la solución de KOH.

m : peso del aceite.

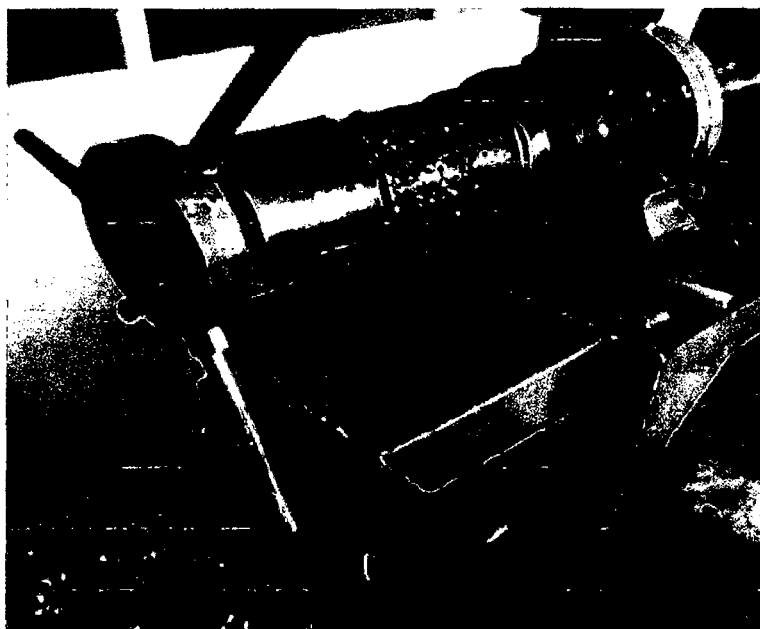


Figura 14: Extracción de aceite de semillas de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L), en la prensa de tornillo sin fin.

Índice de Peróxido. Se determinó usando el método cuantitativo, CDTA (1977), basada en la determinación Yodo-métrica de los Peróxidos orgánicos. Pesamos aproximadamente 5.00 ± 0.005 gr. del aceite en un matraz erlenmeyer de 250 ml de tapa de vidrio, añadimos 10 ml de cloroformo y 15 ml ácido acético glacial, agitamos hasta disolver el aceite, añadimos 1.0 ml de la solución saturada de Yoduro de potasio (KI), se agitó y dejó reposar en oscuridad por 5 minutos. Transcurrido este tiempo retiramos y se agregó 75 ml de agua destilada, inmediatamente se tituló el yodo liberado con tiosulfato de sodio 0.002 N hasta que el color amarilló casi desaparezca, en este instante se añadió 1.0 ml de solución de almidón al 1% y se continuó la titulación agitando vigorosamente hasta que el color azul desaparezca, en paralelo se corrió un blanco.

$$IP = \frac{(V_M - V_B) * N * 1000}{m} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

IP : Índice de peróxidos del aceite ($mg\ O_2/Kg\ aceite$)

V_M : Volumen de gasto (ml) de tiosulfato de sodio 0.002 N de la muestra.

V_B : Volumen de gasto (ml) de tiosulfato de sodio 0.002 N del blanco.
 N : Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.
 m : Peso de la muestra.

Índice de yodo. Se utilizó el método volumétrico y la técnica de titulación con el reactivo de Wij's, CDTA (1977). Pesamos aproximadamente 0.300 g. de aceite en un matraz Erlenmeyer, se disolvió con 15 ml de tetracloruro de carbono, se añadió 25 ml de solución de Wij's y dejamos reposar por 60 minutos en la oscuridad, transcurrido este tiempo agregamos 20 ml de solución de yoduro de potasio (KI) al 10%, agitando se agregó 150 ml de agua destilada, luego se tituló el Yodo con tiosulfato de sodio al 0.1 N hasta que el color amarillo casi desaparezca, instante en el que añadimos 1 ml de solución de almidón al 1%, se continuó titulando hasta que el color azul desaparezca, conjuntamente se corrió un blanco.

$$IY = \frac{(V_B - V_M) * N * 12.69}{m} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

IY : Índice de Yodo del aceite (*g Yodo/100 g aceite*).
 V_M : Volumen de gasto (ml) de tiosulfato de sodio 0.1 N de la muestra.
 V_B : Volumen de gasto (ml) de tiosulfato de sodio 0.1 N del blanco.
 N : Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.
 m : Peso de la muestra.

Índice de saponificación. Se utilizó el método volumétrico, CDTA (1977), y la técnica de titulación. Se pesó 2.5 ml de muestra en un Erlenmeyer de 300 ml., agregamos 25 ml de solución alcohólica de KOH 0.5 N, conectamos el matraz al refrigerante y hervimos la muestra por aproximadamente 30 minutos. Transcurrido el tiempo separamos y enfriamos, agregamos unas gotas de indicador de fenolftaleína y titulamos con solución de HCL 0.5 N, simultáneamente se corrió un blanco.

$$IS = \frac{(V_B - V_M) * N * PM_{KOH}}{m} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

- IS : Índice de Saponificación ($mg\ KOH/g\ aceite$)
 V_M : Volumen de gasto (ml), de la solución de HCL 0.5 N, de la muestra.
 V_B : Volumen de gasto (ml), de la solución de HCL 0.5 N, del blanco.
 N : Normalidad de la solución alcohólica de KOH.
 m : Peso de la muestra.

Densidad del aceite a 15°C. Se utilizó el método gravimétrico mediante la técnica basada en la diferencia de masa, utilizando un picnómetro para obtener la densidad relativa. Pesamos el picnómetro limpio y totalmente seco anotamos, llenamos con agua destilada hasta el borde superior del tubo capilar, pesamos y medimos la temperatura, anotamos estos datos. Secamos el picnómetro y llenamos, esta vez con la muestra de aceite, pesamos y anotamos. El valor de la densidad del agua a la temperatura de referencia se determina del cuadro 106.

$$d'' = \frac{(P'' - P)}{(P' - P)} * D \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

- P : Peso del Picnómetro vacío y seco (g).
 P' : Peso del Picnómetro con el agua destilada (g).
 P'' : Peso del Picnómetro con la muestra de aceite (g).
 D : Densidad del agua a la temperatura de determinación (g/ml).
 d'' : Densidad del aceite (g/ml), sin corregir.

El valor de la densidad calculada anteriormente se corrigió, debido al efecto del empuje del aire por la fórmula.

$$d' = d'' + 0.0012 * (1 - d'') \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

d'' : Densidad del aceite (g/ml), sin corregir.

d' : Densidad del aceite (g/ml), corregido por el empuje del aire.

Finalmente se realizó una segunda corrección, a la temperatura de referencia.

$$d = d' + (T' - T) * 0.00068, \text{ si } T' > T \quad (\text{Ec. 18})$$

$$d = d' - (T - T') * 0.00068, \text{ si } T' < T \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

d' : Densidad del aceite (g/ml), corregido por el empuje del aire, a la temperatura de determinación (T').

d : Densidad del aceite (g/ml), a la temperatura de referencia ($T = 15^\circ\text{C}$).

Viscosidad cinemática a 40°C. Se utilizó un viscosímetro capilar N# 2 (ASTM D445). Se colocó el viscosímetro en el soporte universal y luego se acondicionó a temperatura de 40°C. Tomamos una muestra de aceite previamente filtrado, y colocamos en el tubo de entrada del viscosímetro. Nivelamos el aceite al nivel y esperamos que se dé el equilibrio térmico. Ejercemos una succión leve, lo suficiente para que el aceite fluya por el capilar. Controlamos el tiempo que demora en recorrer el aceite desde el nivel inferior hasta el nivel superior. Estos niveles están indicados con líneas.

Para calcular la viscosidad cinemática el tiempo, en segundos, multiplicamos por un factor del viscosímetro ($f = 0.01$), y finalmente obtenemos el valor en (mm^2/s).

Humedad y materias volátiles (mg/Kg). Método de Secado en Estufa a 105°C por el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, AOAC (1990). Desecamos placas a 105°C y enfriamos en un secador. Pesamos 5.00 g de muestra. Colocamos en la estufa, previamente regulada a 105°C. Después de 30 minutos sacamos, enfriamos y pesamos, luego devolvemos a la estufa. Repetimos esta última operación hasta alcanzar el equilibrio. El contenido de humedad se calcula mediante la fórmula.

$$H = \frac{P_M - P_{S.E.}}{P_M} * 1000000 \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

H : Humedad y materias volátiles (mg/Kg).

P_M : Peso de la muestra húmeda (g).

$P_{S.E.}$: Peso de la muestra seca en equilibrio (g).

Punto de humo (°C). Se sometió 12 mililitros de aceite, a sobrecalentamiento. En el momento en que el aceite comienza a emanar un gas azul, se midió la temperatura alcanzada.

Determinación de cenizas. Se determinó el por el método gravimétrico y la técnica de calcinación. Los crisoles se tratan por 2 horas a 600°C en el horno mufla, se retiró y enfrió. Pesamos 10 gramos de la muestra de aceite en los crisoles y llevamos al horno mufla, previamente regulado a 320°C por 12 horas, para dar una combustión lenta, es decir sin generar llamas. Después a 600°C por 18 horas. Después se enfrió y peso. El contenido de cenizas se determinó por la fórmula.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{P_m - P_{\text{cenizas}}}{P_m} * 100 \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

P_m : Peso de la muestra de aceite (g).

P_{cenizas} : Peso de las cenizas formadas (g).

Impurezas. Se utilizó la técnica de disolución con éter de Petróleo. Pesamos gramos de aceite en un matraz Erlenmeyer, agregamos 200 ml del disolvente, tapamos, agitamos y dejamos en reposo durante 30 minutos. Filtramos en paño de filtro previamente secada y tarada. Lavamos el filtro con pequeñas porciones de disolvente, utilizando la cantidad estrictamente necesaria para que el filtro quede exento de materia grasa. Evaporamos el disolvente en la estufa a 100°C. Retiramos el filtro, dejamos enfriar y pesamos.

$$\% \text{ Impurezas} = \frac{P'' - P'}{P} * 100 \quad (\text{Ec.})$$

Donde:

P'' : Peso en gramos del filtro más impurezas.

P' : Peso en gramos del filtro seco.

P : Peso en gramos de la muestra.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Influencia de la temperatura y del área de secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.).

4.1.1. Cinética de secado de la semilla de piñón blanco a temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C y 65°C con doble y simple área de secado.

En la figura 15 se presentan las curvas básicas de secado para las temperaturas de 35°C y 45°C con simple y doble área de secado, en la figura 16 para las temperaturas de 55°C y 65°C con simple y doble área de secado, en la figura 17 se presenta las curvas de régimen de secado para las temperaturas de 35°C y 45°C con simple y doble área de secado, y en las figura 18 para 55°C y 65°C con simple y doble área de secado, respectivamente, determinadas a partir de los datos del cuadro 03.

En las figuras 15 y 16 se observa que al incrementar la temperatura la velocidad de secado simultáneamente aumenta, disminuyendo la humedad de equilibrio y el tiempo de secado. Como el contenido de humedad disminuyó con el tiempo la velocidad de secado también se redujo, porque el vapor de agua proviene de células parénquimas dentro de la estructura y debe ser transportado a la superficie. La caída de la velocidad de secado es indicativo del aumento de la resistencia a la transferencia de masa y calor, Kashaninejad et al., (2007).

El tiempo necesario para secar las semillas de Piñón blanco desde una humedad inicial de 40.04% hasta una humedad de 9%, es: indeterminado para la temperatura de 35°C ya que solo se puede secar en un tiempo muy prolongado (200 horas) hasta el 14.67%; 89.07 y 80.52 horas para simple y doble área de secado, respectivamente, a 45°C de temperatura; 45.03 y 30.08 horas para simple y doble área de secado, respectivamente, a 55°C de temperatura; 23.52 y 19.33 horas para simple y doble área de secado, respectivamente, a 65°C de temperatura. Sirisomboon et al., (2009) y Ullmann et al., (2010) que estudiaron secado de semillas de *Jatropha curcas* a temperaturas

similares a las que se estudiaron en la presente tesis, reportan tiempos de secado menor, 7 horas para 80°C, 12 horas para 60°C y 13 horas para 40°C, debido al modelo de secador utilizado con flujo de aire forzado.

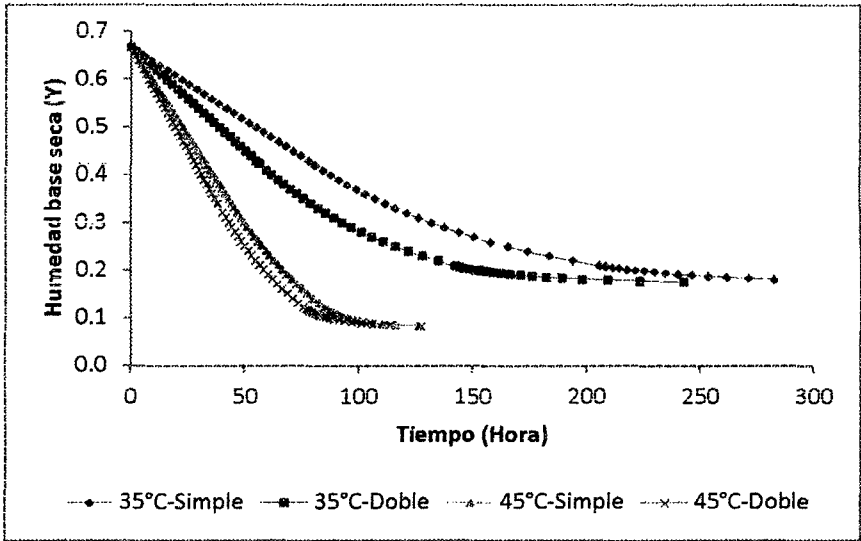


Figura 15: Humedad base seca, ajustada para las temperaturas de secado de 35°C y 45°C con simple y doble área de secado, en función del tiempo.

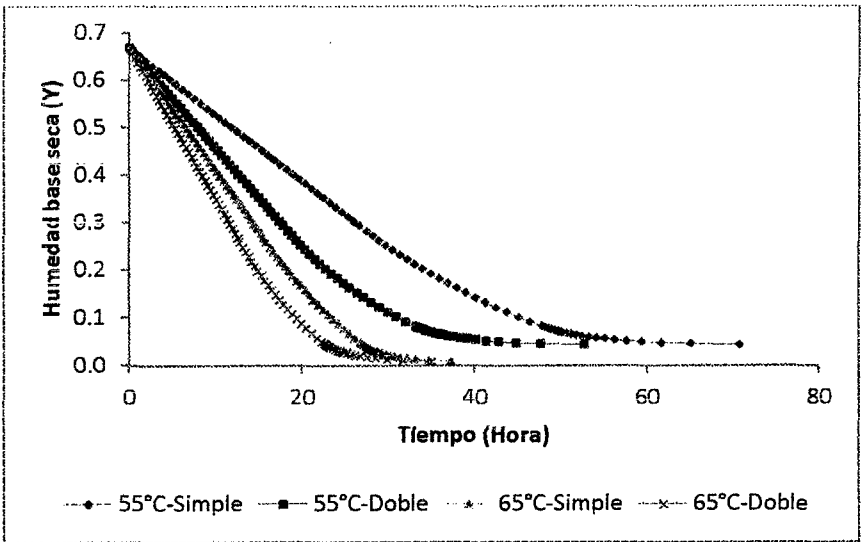


Figura 16: Humedad base seca, ajustada para las temperaturas de secado de 55°C y 65°C con simple y doble área de secado, en función del tiempo.

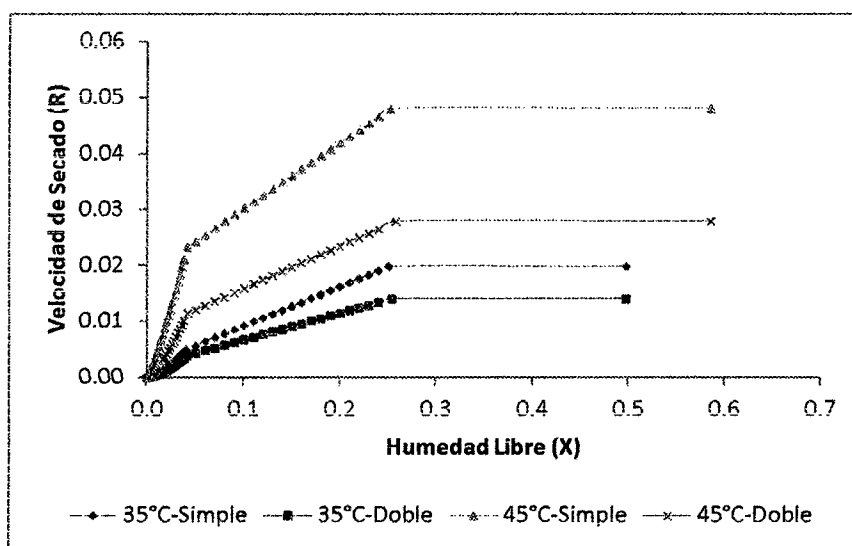


Figura 17: Velocidad de secado, ajustada para las temperaturas de secado de 35°C y 45°C con simple y doble área de secado, en función de la humedad libre.

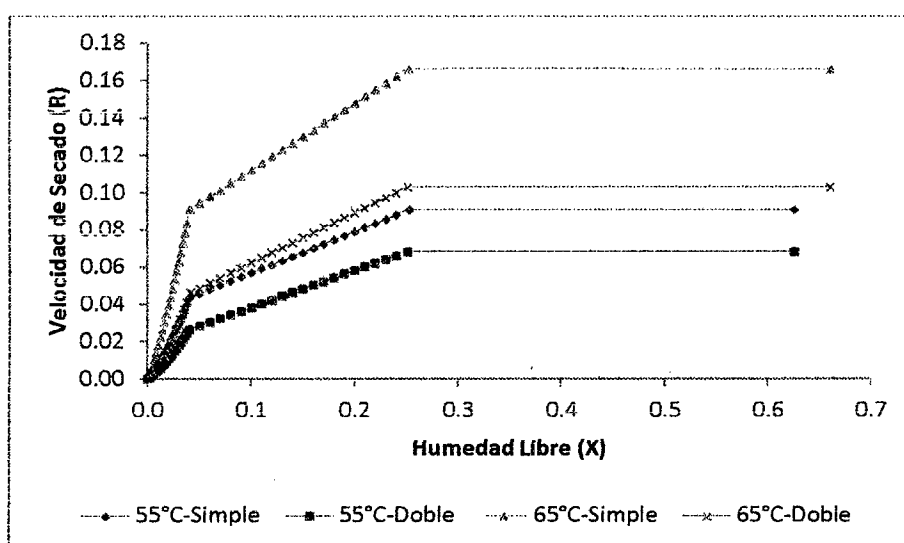


Figura 18: Velocidad de secado, ajustada para las temperaturas de secado de 55°C y 65°C con simple y doble área de secado, en función de la humedad libre.

Humedad base seca de equilibrio “ Y_q ” (Kg H_2O /Kg m. s.). En el cuadro 09 del anexo 01, se presentan los datos experimentales observados para este parámetro, en las figuras 19 y 20 se presentan los valores promedio en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.0077, 0.0417, 0.0816 y 0.1699 Kg H_2O /Kg m. s., para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y

35°C respectivamente. Así mismo 0.0763 y 0.0741 Kg H₂O/Kg m. s., para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **no significativa**, y de la interacción de ambos factores es **no significativa**. Los parámetros del ANVA fueron: ($R^2 = 0.9952$, C.V. = 6.4366 y $Y_q = 0.0752$), ver cuadro 10 del anexo 01.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es significativa, como se muestra en la figura 19. En cambio para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 20. También observar los cuadros 11 y 12 del anexo 1s.

El contenido de humedad de equilibrio de un sólido disminuye al aumentar la temperatura, Geankoplis (1998), es este mismo comportamiento el que se observa en la figura 19, notándose además una clara tendencia. Este mismo comportamiento ha sido reportado por Sirisomboon et al. (2009), estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, Uilmann et al. (2010) estudiando secado de *Jatropha curcas* a 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C, y Tadao et al., (2006) estudiando secado de *Ricinus communis* L. a 40°C, 50°C, 60°C y 70°C.

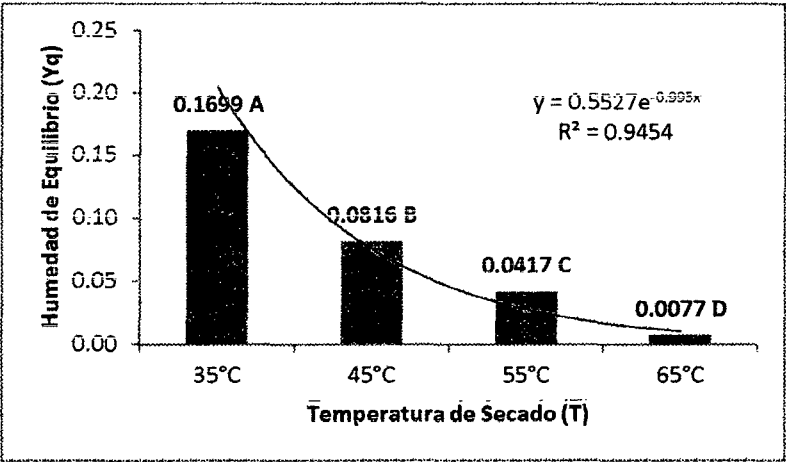


Figura 19: Humedad base seca de equilibrio promedio de las semillas (Y_q) en función de las temperaturas de secado.

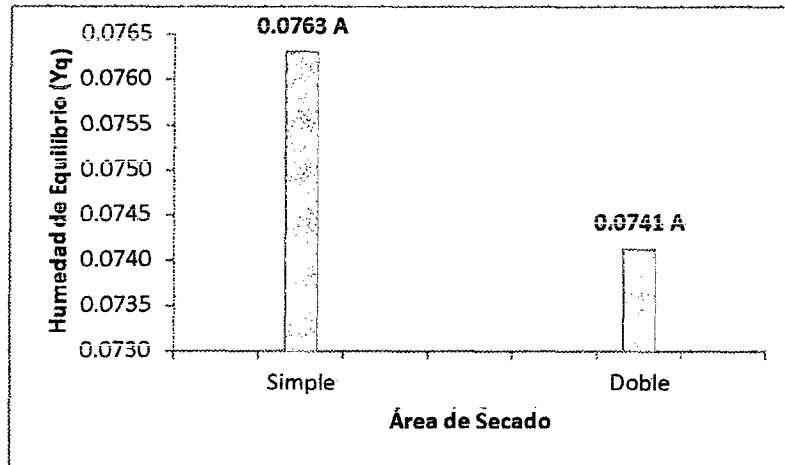


Figura 20: Humedad base seca de equilibrio promedio de las semillas (Y_q) en función del área de secado.

Velocidad de secado en el primer periodo " R_c " ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{H} \cdot \text{m}^2$). En el cuadro 13 del anexo 01 se presentan los datos experimentales observados para este parámetro, en las figuras 21 y 22 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.1348, 0.0796, 0.0381 y 0.0170 $\text{Kg H}_2\text{O}/\text{H} \cdot \text{m}^2$, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C respectivamente. Así mismo 0.0813 y 0.0534 $\text{Kg H}_2\text{O}/\text{H} \cdot \text{m}^2$, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **significativo**, y de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.9999$, $C.V. = 0.7155$ y $R_c = 0.0674$), ver cuadro 14 del anexo 01.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es significativa, como se muestra en la figura 21. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es significativa, como se muestra en la figura 22, también observar los cuadros 15 y 16 del anexo 01.

La velocidad de secado en el primer periodo se ve influenciada por los dos factores de estudio, conforme a Geankoplis, (1998) quien afirma que, en el

primer periodo de secado la superficie de la semilla está muy humedad, permitiendo que la velocidad de secado sea constante, predominando las condiciones externas como temperatura y área de contacto con el aire.

En la figura 21 se puede observar que la velocidad de secado aumenta con el incremento de la temperatura de secado. Este mismo comportamiento ha sido reportado por Sirisomboon et al., (2009), estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, Ullmann et al., (2010), estudiando secado de *Jatropha curcas* a 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C, y Tadao et al., (2006) estudiando secado de *Ricinus communis* L. a 40°C, 50°C, 60°C y 70°C.

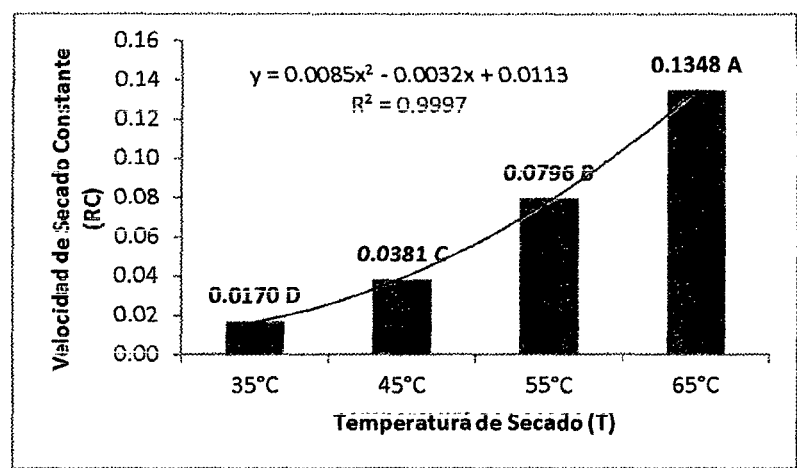


Figura 21: Velocidad de Secado en el Primer Periodo promedio “ R_C ” en función de la temperatura de secado.

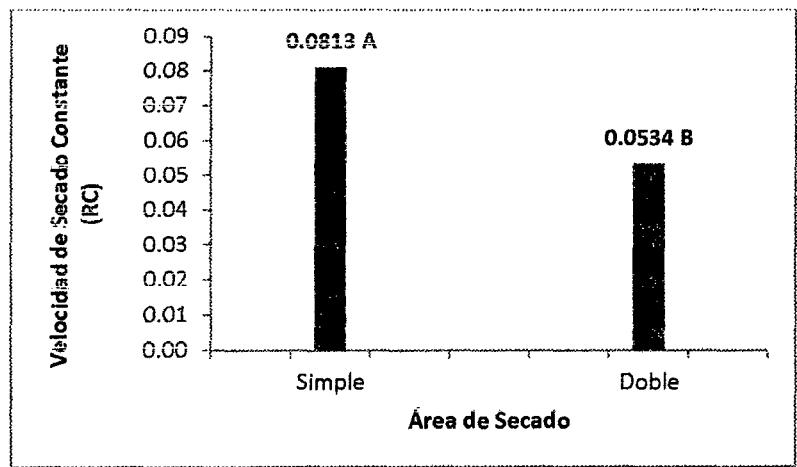


Figura 22: Velocidad de Secado en el Primer Periodo promedio “ R_C ” en función del área de secado.

Humedad libre crítica “X_c” (Kg H₂O/Kg m. s.): En el cuadro 17 del anexo 01 se presentan los datos experimentales observados para este parámetro, en las figuras 23 y 24 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.2514, 0.2522, 0.2549 y 0.2521 Kg H₂O/Kg m. s., para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.2517 y 0.2536 Kg H₂O/Kg m. s., para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.3043$, C.V. = 1.5519 y $X_c = 0.2527$), ver cuadro 18 del anexo 01.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 23. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 24, también observar los cuadros 19 y 20 del anexo 01.

En las figuras 23 y 24 se observa que la humedad crítica (X_c) no muestra dependencia de los factores de estudio. El valor de la humedad crítica depende del tipo de material que se está secando Geankoplis, (1998), es decir, de las condiciones internas más que de las externas.

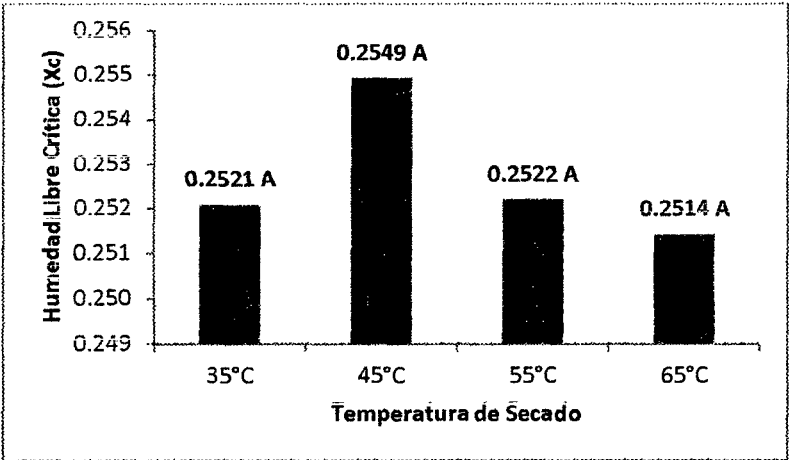


Figura 23: Humedad Libre Crítica promedio “X_c” en función de la temperatura de secado.

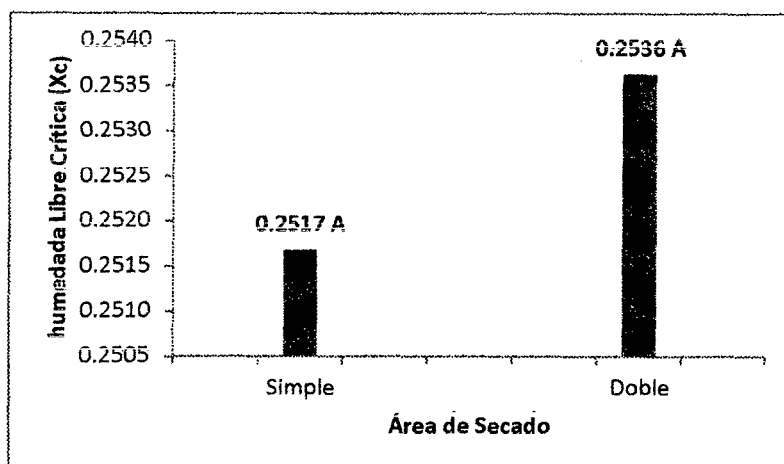


Figura 24: Humedad Libre Crítica promedio " X_c " en función del área de secado.

Humedad libre crítica " X_D " (Kg H_2O /Kg m. s.): En el cuadro 21 del anexo 01 se presentan los datos experimentales observados para este parámetro, en las figuras 25 y 26 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.0412, 0.0402, 0.0414 y 0.0403 Kg H_2O /Kg m. s., para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.0407 y 0.0410 Kg H_2O /Kg m. s., para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron: ($R^2 = 0.3368$, C.V. = 2.5199 y $X_D = 0.0408$), ver cuadro 22 del anexo 01.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 25. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 26, también observar los cuadros 23 y 24 del anexo 01.

El comportamiento de la humedad libre crítica (X_D) en función de los factores de estudio es muy similar al de la humedad crítica (X_C).

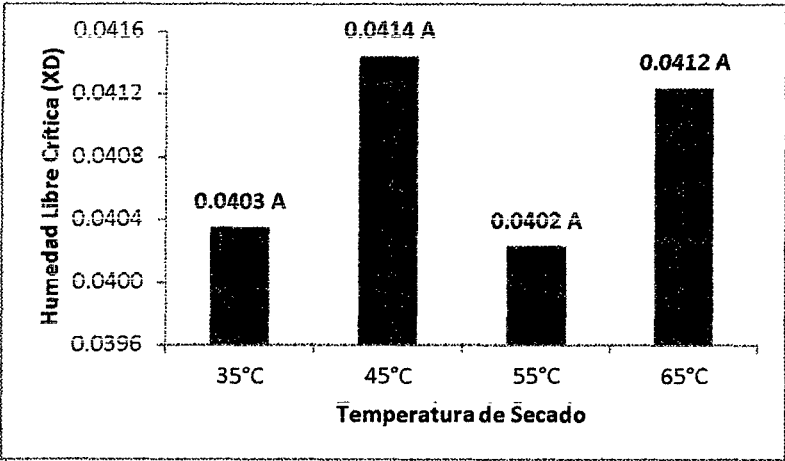


Figura 25: Humedad Libre Crítica promedio “ X_D ” en función de la temperatura de secado.

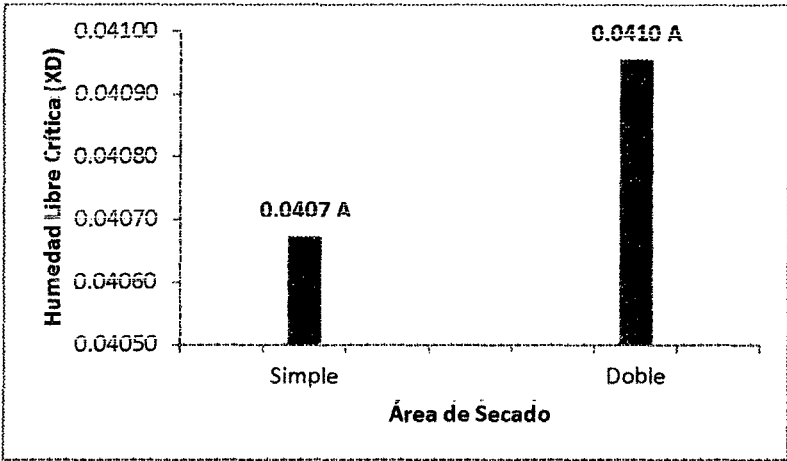


Figura 26: Humedad Crítica promedio “ X_D ” en función del área de secado.

Tiempo total de secado “ t_T ” (Horas) hasta alcanzar 0.02 de humedad base seca libre: En el cuadro 25 del anexo 01 se presentan los datos experimentales observados para este parámetro, en las figuras 27 y 28 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 24.61, 43.66, 87.48 y 182.81 horas, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 96.71 y 72.58 horas, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la temperatura de secado es **significativo**, del área de secado es **significativo**, y

de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.9985$, C. V. = 3.3745 y $t_T = 84.64$), ver cuadro 26 del anexo 01.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es significativa, como se muestra en la figura 27. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es significativa, como se muestra en la figura 28, también observar los cuadros 27 y 28 del anexo 01.

En las figuras 27 y 28 se observa que el tiempo de secado disminuye con el incremento del área y de la temperatura, este mismo comportamiento ha sido reportado por Sirisomboon et al. (2009), estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, Uilmann et al., (2010) estudiando secado de *Jatropha curcas* a 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C, y Tadao et al., (2006) estudiando secado de *Ricinus communis* L. a 40°C, 50°C, 60°C y 70°C.

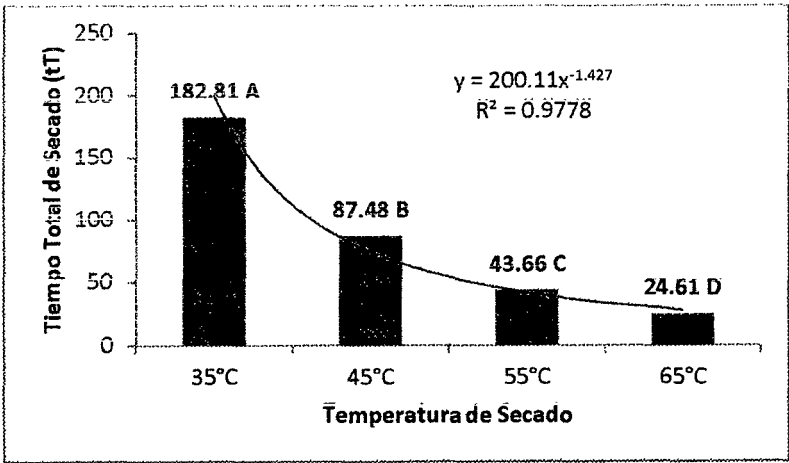


Figura 27: Tiempo Total de Secado promedio “ t_T ” en función de la temperatura de secado.

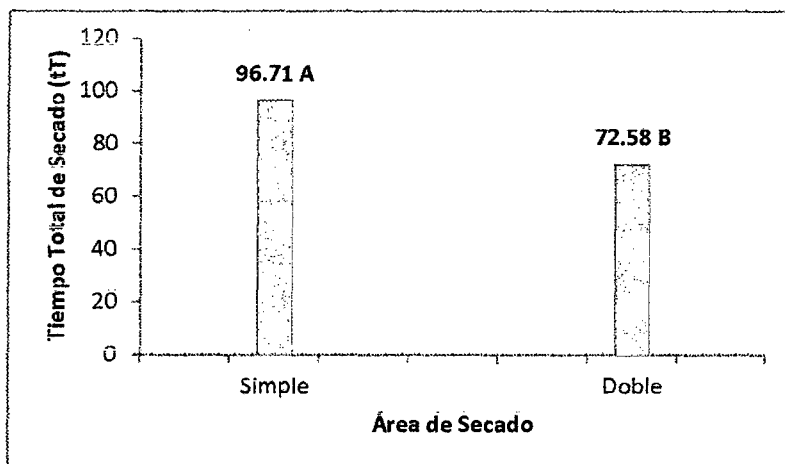


Figura 28: Tiempo Total de Secado promedio " t_T " en función del área de secado.

Basados en los análisis de varianza y la prueba de Tuckey para los parámetros de secado, en el cuadro 03 se presentan los valores de los parámetros y de las constantes de las ecuaciones de cada periodo de secado, promediados según la influencia de cada factor.

Los valores del cuadro 03 fueron obtenidos en una estufa eléctrica de transferencia de calor por convección sin flujo de aire forzado marca MEMMERT, con una relación de peso seco sobre área de 6.4518 Kg m.s./m² y de 3.2259 Kg m.s./m² para simple y doble área de secado, respectivamente, y humedad inicial de 0.6677 Kg H₂O/Kg m.s.

Cuadro 3. Valores de los parámetros y de las constantes de las ecuaciones que describen los periodos de secado en función de la influencia de los factores de estudio.

Temperatura (°C)	Área	Yq (Kg H ₂ O /Kg m.s.)	Rc (Kg H ₂ O/H*m ²)	a	b	m	ln	Xc (Kg H ₂ O libre/Kg m.s.)	XD (Kg H ₂ O libre/Kg m.s.)
35	Simple	0.1699	0.0199	0.0700	0.0023	1.4779	0.0681	0.2526	0.0408
	Doble		0.0141	0.0476	0.0020	1.4776	0.0375		
45	Simple	0.0816	0.0482	0.1183	0.0184	3.2408	0.4314		
	Doble		0.0279	0.0756	0.0084	2.8869	0.1570		
55	Simple	0.0417	0.0909	0.2235	0.0344	7.8492	0.7523		
	Doble		0.0683	0.1977	0.0186	6.0146	0.4243		
65	Simple	0.0077	0.1665	0.3567	0.0767	13.5248	1.6865		
	Doble		0.1032	0.2708	0.0352	11.6049	0.6322		

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Calidad del aceite de piñón blanco proveniente de semillas secadas a temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C y 65°C con doble y simple área de secado.

Cuadro 3.1. Resumen de análisis de control de calidad al aceite secados a temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C y 65°C.

Análisis	Temperatura de Secado				Especificaciones	
	35°C	45°C	55°C	65°C	Límites	Fuente
Índice de Acidez (mg KOH/g)	0.7913	0.3700	0.3908	0.9288	Máx. 2.00	V DIN 51
Índice de Peróxidos (mg O ₂ /Kg)	0.2025	0.1891	0.2675	0.6734	Máx. 4	BIOTE
Índice de Yodo (g I ₂ /100 g)	99.18	100.91	101.88	100.87	95 - 125	V DIN 51
Índice de Saponificación (mg KOH/g)	184.55	187.76	187.28	188.35	195	BIOTE
Contenido de Grasa (%)	48.94	49.01	49.10	49.01	50.29	INIA-EI Por
Densidad a 15°C (g/cm ³)	0.919569	0.919329	0.920172	0.919970	0.900 - 0.930	V DIN 51
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	35.44	34.97	34.79	35.52	Máx. 36	V DIN 51
Humedad y Materias Volátiles (mg/Kg)	516.48	436.01	465.16	640.80	Máx. 750	V DIN 51
Contenido de Cenizas (%)	0.002990	0.003489	0.006473	0.013577	Máx. 0.01	V DIN 51

Índice de acidez (mg KOH/g aceite): en el cuadro 29 del anexo 02, se presentan los datos experimentales del índice de acidez del aceite, en las figuras 30 y 31 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.9288, 0.3908, 0.3700 y 0.7913 mg KOH/g aceite, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.6205 y 0.6199 mg KOH/g aceite, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 \equiv 0.9889$, C. V. $\equiv 4.8965$ y $IA_{prom} \equiv 0.6202$), ver cuadro 30 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de 65°C y 35°C es significativo tanto entre sí como con las demás, en cambio la diferencia entre las medias de 55°C y 45°C es no significativa, como se muestra en la figura 30. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 31, también observar los cuadros 31 y 32 del anexo 2.

El elevado valor del índice de acidez que se observa en el aceite obtenido de las semillas secadas a 65 °C está relacionado con el elevado valor del índice de peróxidos, que se muestra en la figura 32 para la misma temperatura de secado, pues esta temperatura ocasionó la formación de peróxidos, y en algunos casos el rompimiento de cadenas de ácidos grasos, favoreciendo el incremento del índice de acidez.

Para el elevado valor del índice de acidez del aceite obtenido de semillas secadas a 35°C, se debe a que la temperatura antes mencionada genera un tiempo prolongado de secado, permitiendo que la humedad favorezca reacciones enzimáticas y el desarrollo de microorganismos en la semilla, en la figura 29 se puede apreciar este efecto, se nota que las semillas presentan zonas blanquecinas evidenciando la presencia de hongos, pues estos sumados a la actividad enzimática propia de la semilla favorecieron el incremento del índice de acidez, sin la formación de peróxidos.

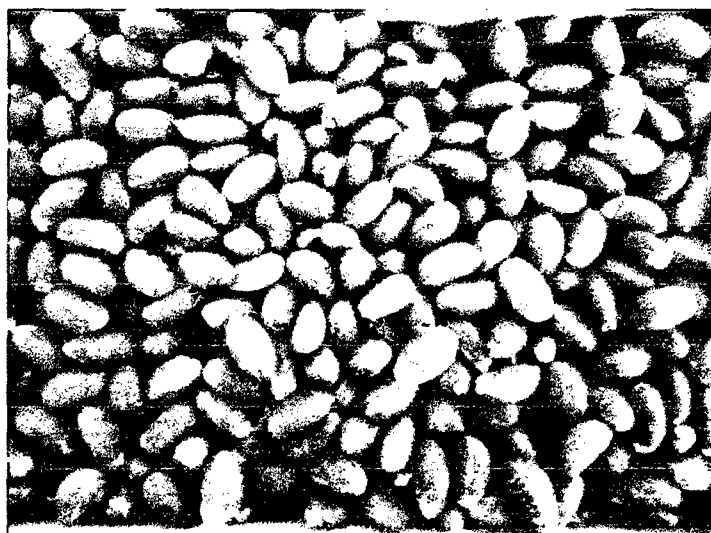


Figura 29: Semillas de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L), secadas a 35°C, con presencia de hongos.

La norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007), anexo 08, reporta un valor máximo aceptable de 2.000 mg KOH/g aceite. El laboratorio Analytik Service Gesellschaft (2010), anexo 08, reporta que el índice de acidez promedio, en una muestra de aceite proveniente de frutos de Piñón Blanco maduros ecotipo Totorillayco, es de 0.2280 mg KOH/g aceite. Los valores de índice de acidez que se reportan en este experimento están dentro de los valores aceptables para este parámetro de calidad de aceite para biodiesel.

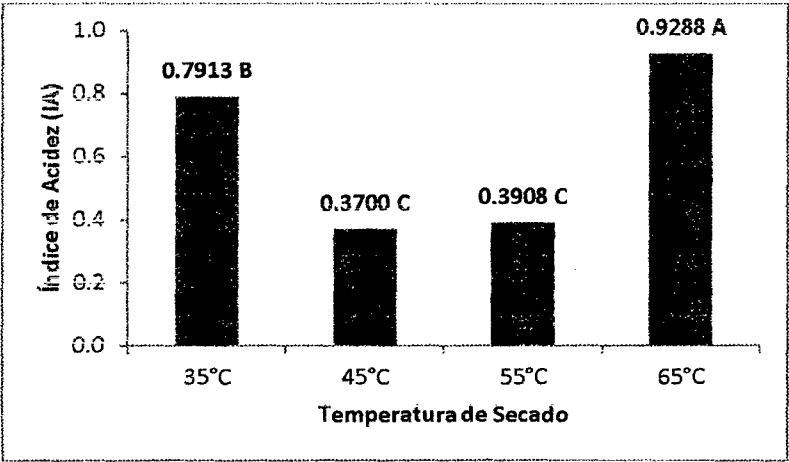


Figura 30: Índice de Acidez promedio (mg KOH/g aceite) en función de la temperatura de secado.

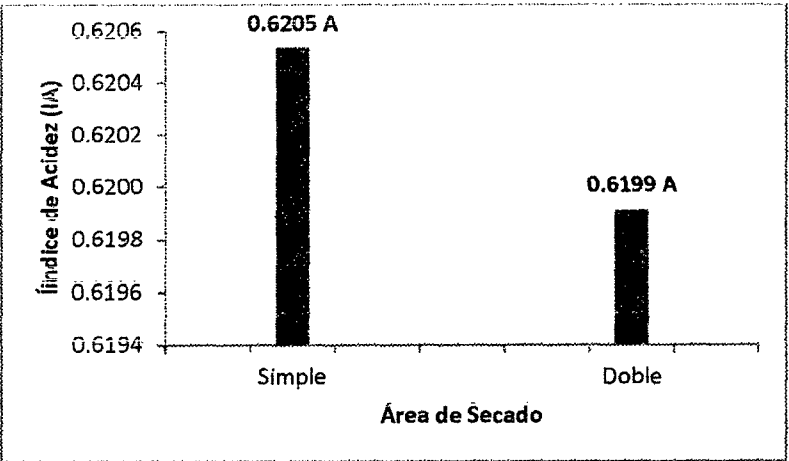


Figura 31: Índice de Acidez promedio (mg KOH/g aceite) en función del área de secado.

Índice de peróxido ($\text{mg O}_2/\text{Kg aceite}$): en el cuadro 33 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del índice de peróxido del aceite, en las figuras 32 y 33 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.6734, 0.2675, 0.1891 y 0.2025 $\text{mg O}_2/\text{Kg aceite}$, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.3561 y 0.3102, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **significativo**, y de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.9685$, C.V. = 12.8957 y $\text{IP}_{\text{prom}} = 0.3331$), ver cuadro 34 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de 65°C y 55°C es significativo tanto entre sí como con las demás, en cambio la diferencia entre las medias de 45°C y 35°C es no significativa, como se muestra en la figura 32. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es significativa, como se muestra en la figura 33, también observar los cuadros 35 y 36 del anexo 2.

Según Castillo (2006), la velocidad de oxidación crece con el incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre). La temperatura de 65°C es la más elevada y explicaría el elevado valor del índice de peróxido del aceite obtenido de semillas secadas a esta temperatura, en el análisis de cinética de secado se ha demostrado que el tiempo de secado es mayor en el secador con simple área, esto implica mayor tiempo de exposición para las semillas que se secan en este tipo de bandejas.

BIOTEL (2010), cuadro 105 del anexo 05, reporta que el índice de peróxido de aceite de Piñón Blanco, es 4.000 $\text{mg O}_2/\text{Kg aceite}$. Los valores de índice de

peróxido que se reportan en este experimento están dentro de los valores aceptables para este parámetro de calidad de aceite, para biodiesel.

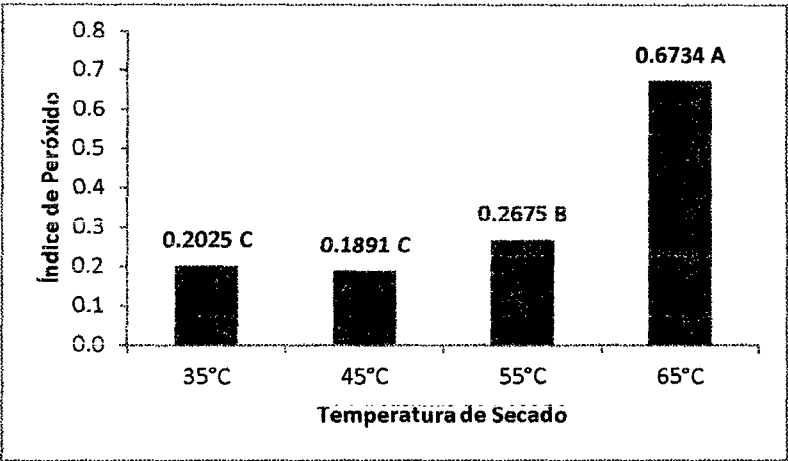


Figura 32: Índice de Peróxido promedio (mg O₂/Kg aceite) en función de la temperatura de secado.

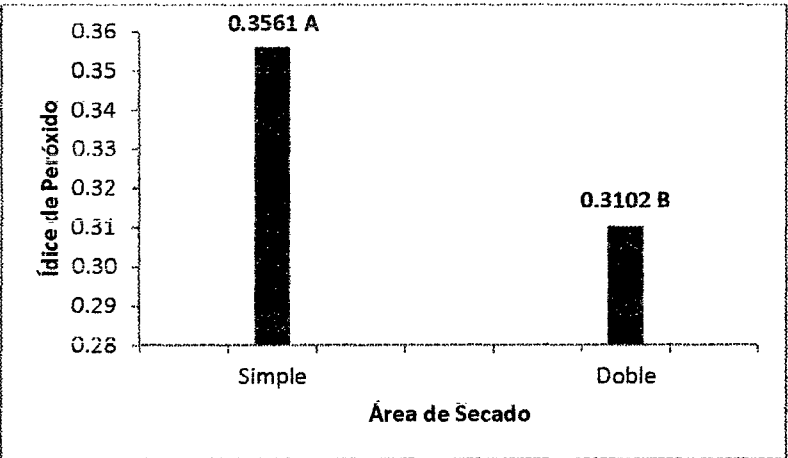


Figura 33: Índice de Peróxido promedio (mg O₂/Kg aceite) en función del área de secado.

Índice de yodo (g Yodo/100 g aceite): en el cuadro 37 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del índice de yodo del aceite, en las figuras 34 y 35 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 100.87, 101.88, 100.91 y 99.18 g Yodo/ 100 g aceite, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C

respectivamente. Así mismo 100.44 y 100.99 g Yodo/100 g aceite, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.1524$, C.V. = 3.0553 y $IY_{prom} = 100.71$), ver cuadro 38 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 34. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 35, también observar los cuadros 39 y 40 del anexo 2.

La norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007), anexo 08, reporta un rango aceptable de 95 – 125 g Iodo/100 g aceite. Los valores que se reportan en este experimento están dentro de la norma y son muy similares a otros reportes como la del laboratorio Alemán Analytik Service Gesellschaft (2010), anexo 08, que precisa un valor promedio de 101.0 g Iodo/100 g aceite y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, que reporta 110.5 g Iodo/100 g aceite.

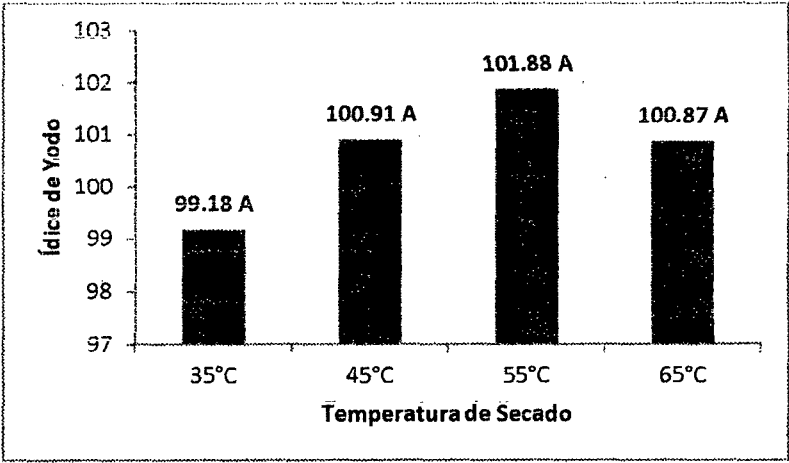


Figura 34: Índice de Yodo promedio (g Yodo/100 g aceite) en función de la temperatura de secado.

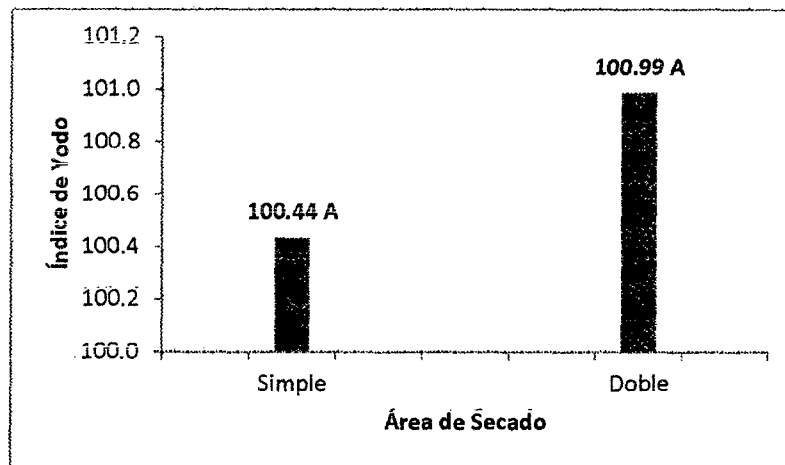


Figura 35: Índice de Yodo promedio (g Yodo/100 g aceite) en función del área de secado.

Índice de saponificación (mg KOH/g aceite): en el cuadro 41 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del índice de saponificación del aceite, en las figuras 36 y 37 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 188.35, 187.28, 187.55 y 184.55 mg KOH/g aceite, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C respectivamente. Así mismo 186.57 y 187.40 mg KOH/g aceite, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.6914$, C.V. = 0.9829 y $IS_{prom} = 186.99$), ver cuadro 42 del anexo 02.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de 65°C, 55°C y 45°C es no significativa y la de 35°C es significativa, como se muestra en la figura 36. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 37, también observar los cuadros 43 y 44 del anexo 2.

El índice de saponificación es una medida aproximada del peso molecular promedio de los ácidos grasos, Castillo (2006). Como se muestra en la figura 36, a 35°C se ha obtenido el menor valor del índice de saponificación, sin embargo los valores son muy similares a otros reportes como el de BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, 195.0 mg KOH/g aceite.

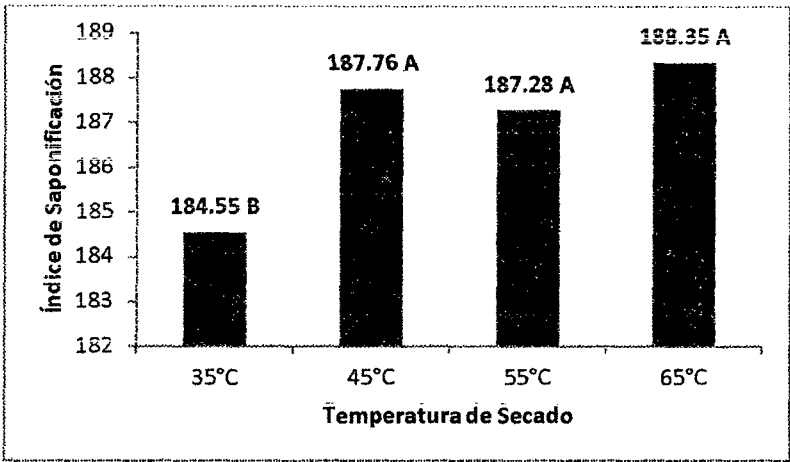


Figura 36: Índice de saponificación promedio (mg KOH/g aceite) en función de la temperatura de secado.

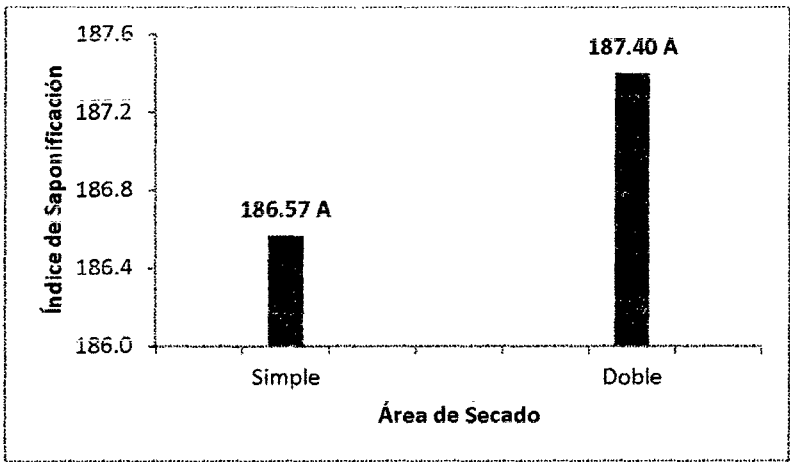


Figura 37: Índice de Saponificación promedio (mg KOH/g aceite) en función del área de secado.

Contenido de grasa total (g aceite/100 g almendra seca): en el cuadro 45 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del contenido de grasa de la almendra, en las figuras 38 y 39 se presentan los valores promedios en función

de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 49.01, 49.10, 49.01 y 48.94 Kg aceite/Kg almendra seca, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C respectivamente. Así mismo 49.09 y 48.94 Kg aceite/Kg almendra seca, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 \equiv 0.0610$, C.V. $\equiv 1.3807$ y $\% \text{ Grasa Total}_{\text{prom}} \equiv 49.01$), ver cuadro 46 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 38. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 39, también observar los cuadros 47 y 48 del anexo 2.

Los factores de estudio de este experimento no afectaron el valor del contenido de grasa total de la almendra de Piñón blanco, sin embargo los valores que se reportan son muy similares a otros reportes como del INIA – El Porvenir – Laboratorio de Postcosecha y agroindustria (2010), que presenta en la ficha técnica del ecotipo Totorillayco, cuadro 108 del anexo 07, 50.29%.

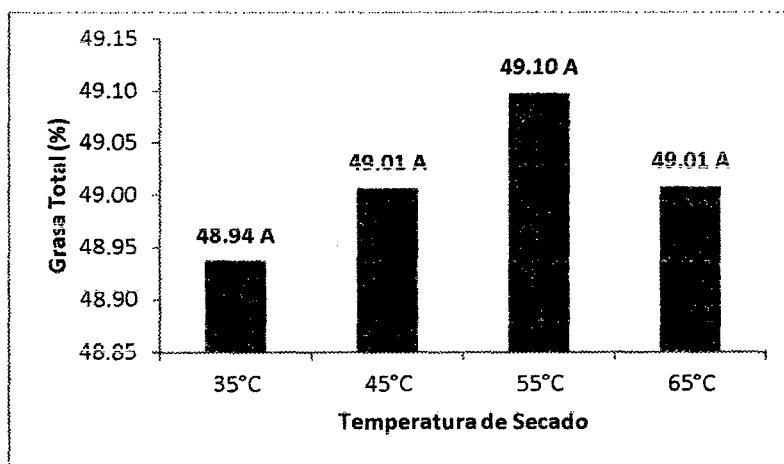


Figura 38: Contenido de grasa total promedio (g aceite/100 g almendra seca) en función de la temperatura de secado.

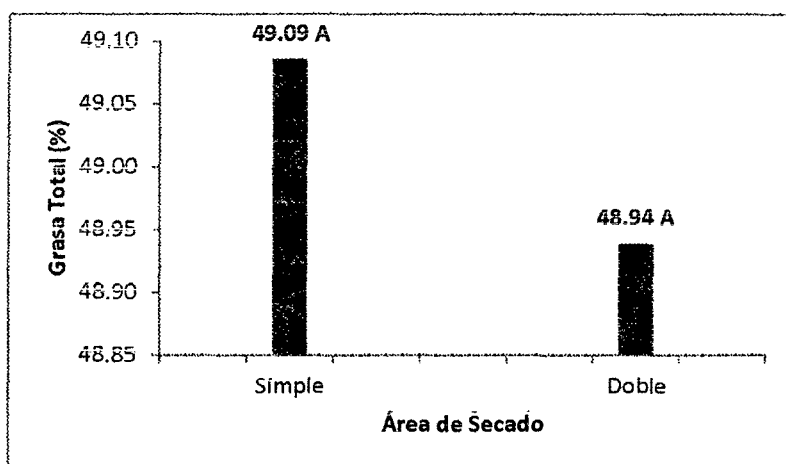


Figura 39: Contenido de grasa total promedio (g aceite/100 g almendra seca) en función del área de secado.

Densidad a 15°C (g/mL): en el cuadro 49 del anexo 02 se presentan los datos experimentales de la densidad a 15°C del aceite, en las figuras 40 y 41, se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.919970, 0.920172, 0.919329 y 0.919569 g/mL, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.919997 y 0.919524 g/mL, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área de secado** es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.1681$, C.V. = 0.1194 y $Densidad_{prom} = 0.919760$), ver cuadro 50 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 40. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 41, también observar los cuadros 51 y 52 del anexo 2.

Los valores que se presentan están dentro de la norma técnica de aceite para producción de biodiésel, (V DIN 51 605, 2007) anexo 08, que reporta un rango de 0.900 – 0.930 g/cm³ y son muy similares a otros reportes como la del laboratorio Alemán, Analytik Service Gesellschaft, (2010), anexo 08, que precisa un valor promedio de 0.9192 g/cm³ y BIOTEL (2010), cuadro 105 del anexo 05, reporta 0.919 g/cm³. Cabe indicar que todos los valores de densidad están determinados a 15°C.

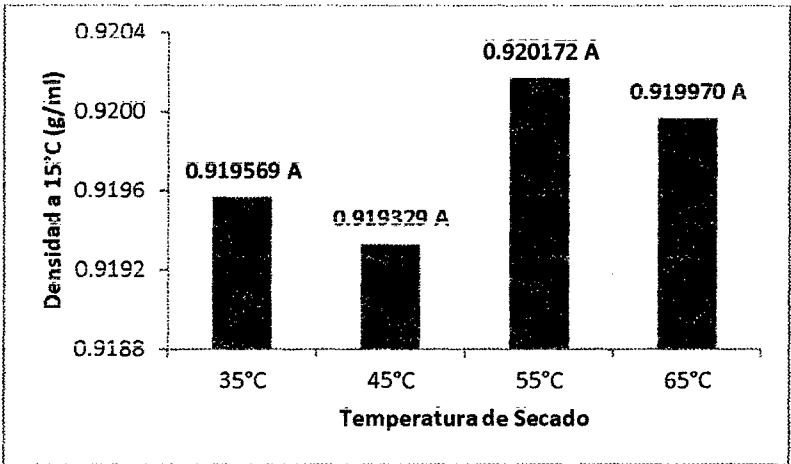


Figura 40: Densidad promedio a 15°C (g/mL) en función de la temperatura de secado.

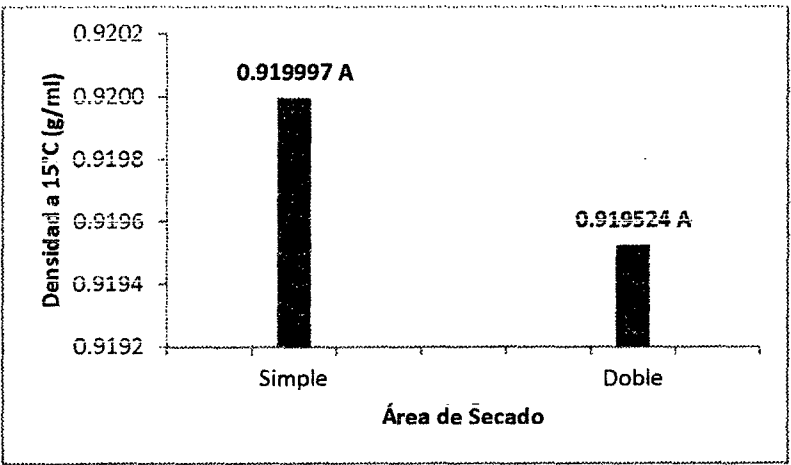


Figura 41: Densidad promedio a 15°C (g/mL) en función del área de secado.

Viscosidad cinemática a 40°C (mm²/s): en el cuadro 53 del anexo 02 se presentan los datos experimentales de la viscosidad cinemática a 40°C del

aceite, en las figuras 42 y 43 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 35.52, 34.79, 34.97 y 35.44 mm²/s, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C respectivamente. Así mismo 35.04 y 35.31 mm²/s, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **no significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANOVA fueron; ($R^2 \equiv 0.1942$, C.V. $\equiv 2.4653$ y Viscosidad_{prom} $\equiv 35.18$), ver cuadro 54 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 42. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 43, también observar los cuadros 54 y 55 del anexo 2.

Los valores que se reportan en este experimento están por debajo del máximo indicado por la norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007), anexo 08, siendo 36 mm²/s y son muy similares a otros reportes como la del laboratorio Alemán (Analytik Service Gesellschaft, 2007), anexo 08, que precisa un valor promedio de 35.25 mm²/s y BIOTEL (2010), cuadro 105 del anexo 05, reporta 33.6 mm²/s. Cabe indicar que todos los valores de viscosidad están determinados a 40°C.

Humedad y materias volátiles (mg agua/Kg aceite): en el cuadro 57 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del contenido de humedad y materias volátiles del aceite, en las figuras 44 y 45 se presentan los valores promedios en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 640.80, 516.48, 436.01 y 465.16 mg agua/Kg aceite, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 513.61 y 515.62 mg agua/Kg aceite, para simple y doble área de secado, respectivamente.

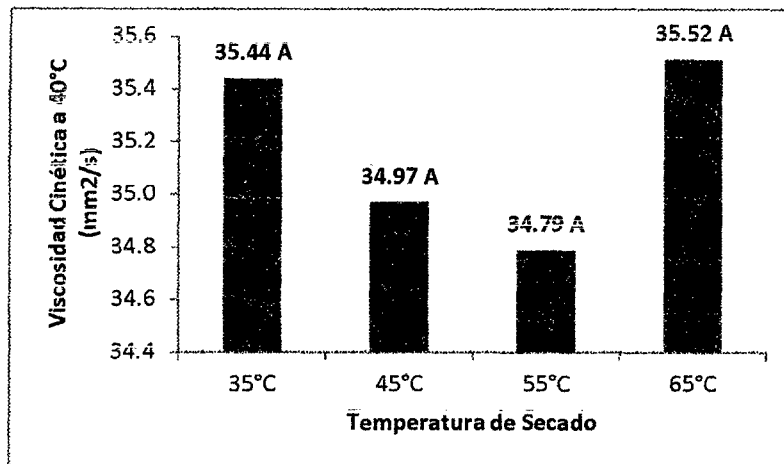


Figura 42: Viscosidad cinemática promedio a 40°C (mm²/s) en función de la temperatura de secado.

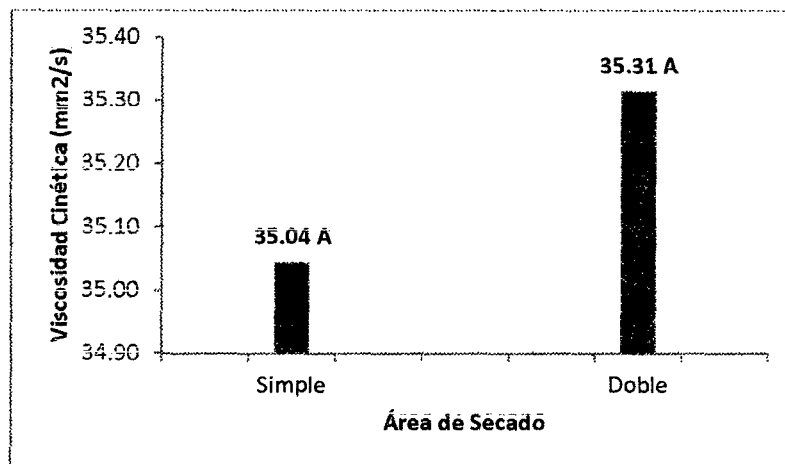


Figura 43: Viscosidad cinemática promedio a 40°C (mm²/s) en función del área de secado.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.9419$, C.V. = 5.6439 y Humedad_{prom} = 514.61), ver cuadro 58 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre la media de 65°C es significativa, así mismo la de 35°C, en cambio 55°C y 45°C son no significativo, como se muestra en la figura 44. Para

el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 45, también observar los cuadros 59 y 60 del anexo 2.

El elevado valor del contenido de humedad del aceite obtenido de semillas secadas a 65°C, puede deberse al prensado, puesto que las semillas terminan con 0.0077 Kg agua/Kg m.s. de humedad, lo cual es perjudicial al momento de extraer el aceite en la prensa de tornillo sin fin, pues estudios realizados por los investigadores del área de Postcosecha y agroindustria de la E.E.A. El Porvenir – INIA, mostraron que la humedad con la que ingresa la semilla a la prensa influye en el rendimiento del aceite, así mismo las especificaciones técnicas de la prensa indica que las semillas deben estar entre 6% y 8% de humedad para una mejor extracción. En el caso particular de las semillas secadas a 65°C de este experimento, la extracción requiere una mayor fuerza de prensado generando mayor fricción en la torta y de esta forma arrastrando elementos que son indeseables, diferentes del aceite, como la humedad y cenizas.

Las semillas secadas a 35°C contienen alta humedad (14.61%) el cual, en el proceso de prensado es arrastrado.

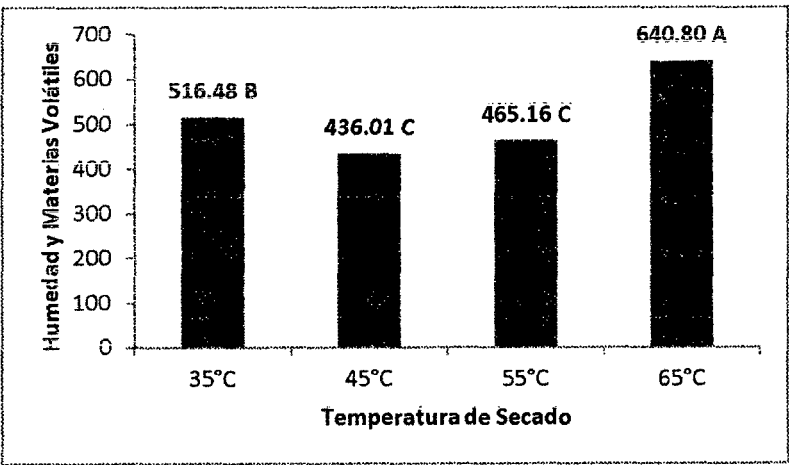


Figura 44: Humedad y Materias Volátiles promedio (mg agua/Kg aceite) en función de la temperatura de secado.

La norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007) anexo 08, reporta un máximo de 750 mg H₂O/Kg aceite, los valores son inferiores al máximo reportado en la norma técnica y muy similar a otros reportes como la del laboratorio Alemán (Analytik Service Gesellschaft, 2010) anexo 08, que precisa un valor promedio de 1165 mg H₂O/Kg aceite y BIOTEL (2010), cuadro 105 del anexo 05, 500 mg H₂O/Kg aceite.

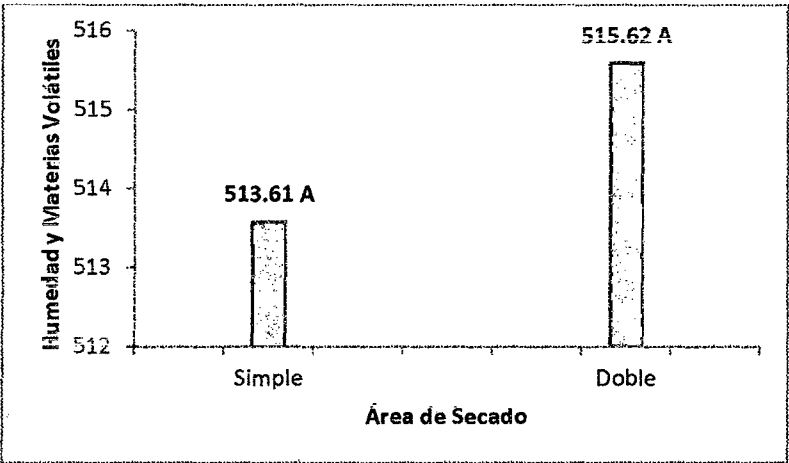


Figura 45: Humedad y Materias Volátiles promedio (mg agua/Kg aceite) en función del área de secado.

Cenizas totales (g cenizas/100 g aceite): en el cuadro 61 del anexo 02 se presentan los datos experimentales del contenido de cenizas totales del aceite y en las figuras 46 y 47 se presentan los valores promedio en función de la temperatura y área de secado, respectivamente, siendo 0.013577, 0.006473, 0.003489 y 0.002990 g cenizas/100 g aceite, para las temperaturas de 65°C, 55°C, 45°C y 35°C, respectivamente. Así mismo 0.006788 y 0.006476 g cenizas/ 100 g aceite, para simple y doble área de secado, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto de la **temperatura** de secado es **significativo**, del **área** de secado es **no significativo**, y de la interacción de ambos factores es **no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.9691$, C.V. = 13.1636 y % Cenizas_{prom} = 0.006632), ver cuadro 62 del anexo 2.

La prueba de Tuckey para el efecto de la temperatura de secado indica que la diferencia entre la media de 65°C es significativa, así mismo la de 55°C, en cambio 45°C y 35°C son no significativo, como se muestra en la figura 46. Para el efecto del área de secado, la diferencia entre las medias de los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 47, también observar los cuadros 63 y 64 del anexo 2.

El elevado valor del contenido de cenizas del aceite obtenido de semillas secadas a 65°C tiene relación con el comportamiento de las semillas en la extracción en la prensa de tornillo sin fin, por bajo contenido de humedad, ocasionando mayor presión y generando el arrastre de sustancias abrasivas de las semillas.

La norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007) anexo 08, reporta un máximo de 0.01 %. Con la excepción del de 65°C, todos los valores son inferiores al máximo reportado en la norma técnica y muy similar a otros reportes como la del laboratorio Alemán (Analytik Service Gesellschaft, 2010) anexo 08 anexos, que precisa un valor inferior a 0.001% y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, 0.002%.

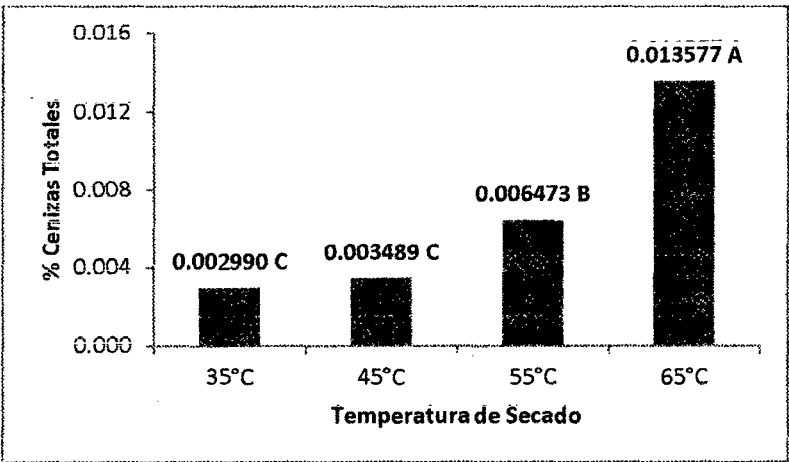


Figura 46: Contenido de Cenizas Totales promedio (g cenizas/100 g aceite) en función de la temperatura de secado.

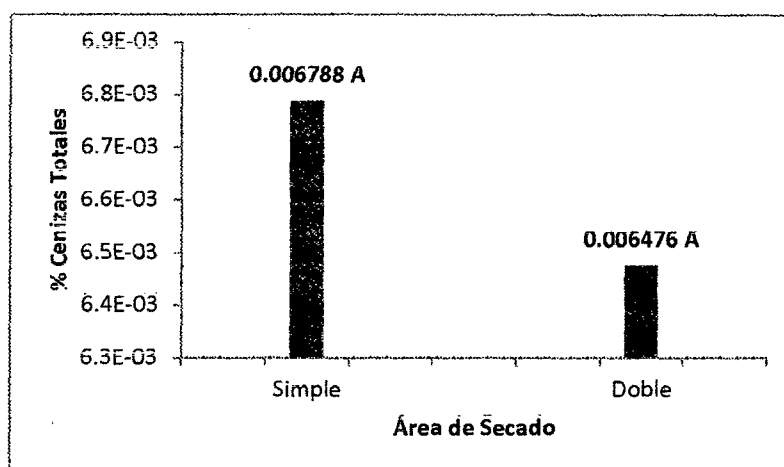


Figura 47: Contenido de Cenizas Totales promedio (g cenizas/100 g aceite) en función del área de secado.

4.2. Influencia del modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.).

4.2.1. Aspectos económicos:

En los cuadros 108 y 109 del anexo 09, se presentan los costos de instalación de los modelos de secador solar (Plataforma y Parihuela) respectivamente, detallando los materiales y otros recursos utilizados.

El costo total de instalación del modelo plataforma es S/. 1394.33 y el del modelo parihuela es S/. 1545.43. El costo de instalación de un secador tradicional es S/. 45.10, que es el precio de una manta plástica de polipropileno negra de 20 m².

El costo de instalación del modelo parihuela excede en S/. 151.1 al del modelo plataforma. En términos de costos de instalación el modelo más económico es el modelo tradicional, seguida del modelo plataforma y finalmente el modelo parihuela.

4.2.2. Propiedades de secado:

Primera Cosecha: en el cuadro 65 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de temperatura, humedad relativa del aire y humedad de las semillas, correspondiente al secado de la primera cosecha.

En la figura 48 se presenta la variación de la temperatura del aire de secado en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha. Como se puede apreciar la temperatura al comenzar el día muestra un valor bajo, que aumenta conforme transcurre el día, y disminuye al terminar el mismo, se puede apreciar también que el secador tradicional presenta temperaturas más uniformes, algo que no se observa con los modelos plataforma y parihuela que muestran mayor variación, este mismo comportamiento observo Restrepo et al., 2005 estudiando la disponibilidad térmica y su aplicación en el secado de granos (café y arroz).

En la mayor parte del día la temperatura del aire que fluye por el secador de plataforma es mayor seguido del modelo parihuelas y finalmente del modelo tradicional, alcanzando temperaturas máximas de 56.2°C, 42.5°C y 36.4°C, mínimas de 31.2°C, 27.2°C y 25.1°C y promedio de 38.2°C, 35.4°C y 32.4°C, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que en la latitud 06° 35', longitud 76° 19' y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilómetro de los secadores solares, la temperatura máxima promedio mensual del mes de noviembre del 2010 es 33.0°C, mínima de 21.8°C y promedio de 27.0°C, ver figura 131 del anexo 10, los cuales son muy cercanos a los valores de temperatura que se registran en el secador tradicional, considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento solo las horas de radiación solar del día.

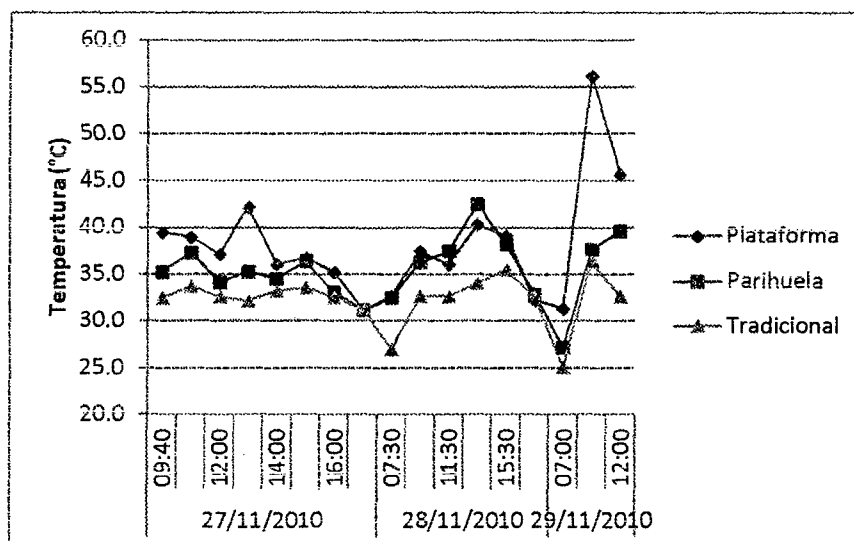


Figura 48: Temperatura de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha.

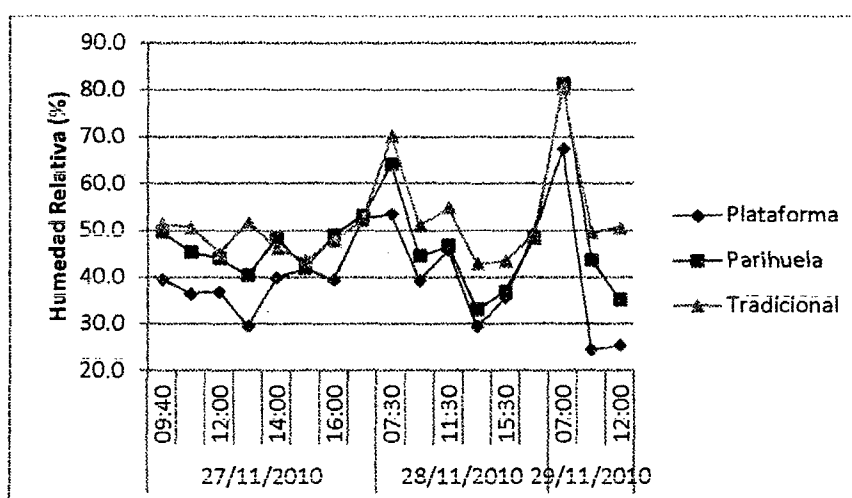


Figura 49: Humedad relativa del aire de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha.

En la figura 49 se presenta la variación de la humedad relativa del aire de secado conforme transcurre el día, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha. En el comienzo del día la humedad relativa es alta y muy similar para todos los modelos, pero conforme transcurren las horas el modelo plataforma muestra los valores más bajos, seguida del modelo parihuela y muy similar el modelo tradicional, alcanzando humedades relativas mínimas de 24.5%, 33.1% y 42.8%, máximas de 67.5%, 81.4% y 80.5%, y promedias de

40.4%, 47.4% y 51.9%, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que, en la latitud $06^{\circ} 35'$, longitud $76^{\circ} 19'$ y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilómetro de los secadores solares, la humedad relativa promedio del mes de noviembre del 2010 fue 74%, ver figura 131 del anexo 10, el cual es muy cercano al valor de humedad relativa promedio que se registra en el secador tradicional, considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento solo las horas de radiación solar del día.

En la figura 50 se presenta el porcentaje de humedad de las semillas en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha. En esta figura se puede apreciar la disminución de la humedad con el tiempo (horas de sol) notándose que durante el transcurso de la noche las semillas ganan humedad, debido a la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa, facilitando la ganancia de humedad, Hidalgo y Garay (2005), también observaron este mismo comportamiento, estudiando secado solar de semillas de maíz en los mismos modelos de estudio.

Algo muy importante que se puede notar es la semejanza de las curvas, lo cual sugiere velocidades similares de secado, a pesar de que el modelo plataforma tiene temperaturas más altas y humedades relativas más bajas que los modelos parihuela y tradiciones. Hidalgo y Garay, 2005, observaron que el modelo de secador de plataforma presentaba mayor velocidad de secado, esto se puede deber al tipo de materias de secado, ya que el tipo de cubierta de las semillas de maíz y Piñón blanco son muy distintas y genera mayor tiempo de secado para el primero.

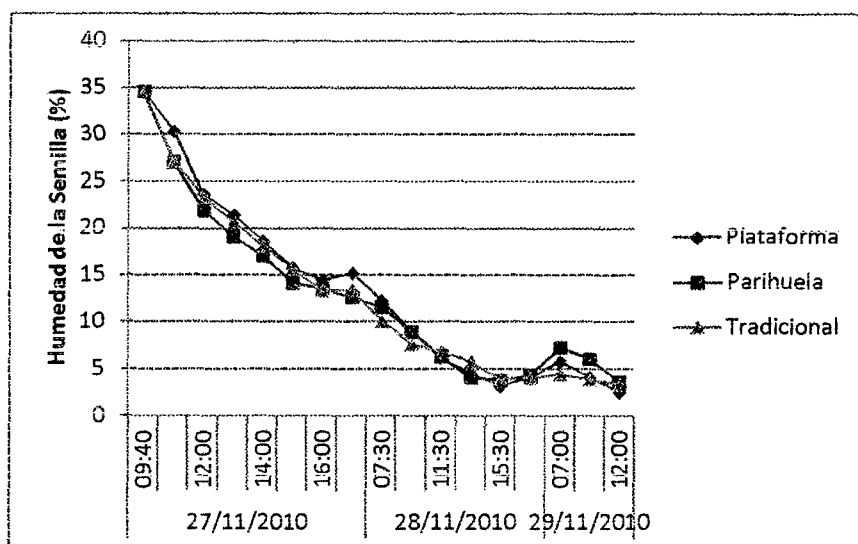


Figura 50: Humedad base húmeda de las semillas de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha.

En el cuadro 04 se presenta los parámetros de ajuste de los datos de secado solar, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha, a los modelos matemáticos de Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996) y Page modificado (White et al., 1981; Yaldiz et al., 2001).

Ambos modelos presentan muy buena calidad de ajuste a los datos experimentales con coeficientes de determinación (R^2) mayores 0.96, pero el modelo Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996) muestra mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor valor de Chicuadrada (X^2) para los tres casos. (Sirisomboon et al. 2009) estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, evaluó 6 modelos matemáticos, logarítmico (Yagcioglu et al., 1999), Newton (Hummedia y Sheikh, 1989), Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996), Page modificado (White et al., 1981; Yaldiz et al., 2001) Henderson y Pabis (Chhinnman, 1984; Guarte, 1996), y Wang y Singh (Wang & Singh, 1978), recomendando el modelo matemático logarítmico por mostrar mayor coeficiente de determinación.

Cuadro 4. Resumen de los parámetros de las ecuaciones y ajuste de cada modelo matemático propuesto a los datos experimentales de secado, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha.

PARAMETROS	PLATAFORMA		PARIHUELA		TRADICIONAL	
	Page	Page modif.	Page	Page modif.	Page	Page modif.
K	0.22349	0.43372	0.33443	0.46288	0.29421	0.44293
N	0.90002	0.43372	0.7308	0.46288	0.77531	0.45422
ChiSquare	4.14E-04	7.51E-04	2.44E-04	0.00291	3.73E-04	0.00211
SSR	0.00414	0.00751	0.00244	0.02906	0.00373	0.02107
Correlation	0.99779	0.99598	0.99852	0.9822	0.99776	0.98731
COD(R^2)	0.99558	0.99198	0.99703	0.96471	0.99553	0.97478

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 51 se muestra la humedad adimensional, ajustada al modelo de Page, en función del tiempo de secado al sol, correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha. Como se puede notar el modelo con mayor velocidad de secado es el de parihuela seguida del modelo tradicional y finalmente plataforma, durante las 6 primeras horas de secado, y posteriormente se observa mucha similitud.

El tiempo necesario, para secar las semillas de Piñón blanco desde 34.62% de humedad inicial hasta 7.00% de humedad final, calculadas por la ecuación de Page, es: 11.13 horas de sol para el modelo plataforma, 11.20 horas de sol para el modelo parihuela y 11.50 horas de sol para el modelo tradicional. Como se puede notar no existe amplia diferencia en los tiempos de secado. Hidalgo y Garay (2005), reportan que el tiempo para secar las semillas de maíz hasta 13.5% de humedad es: 3.00 días, 5.30 días y 6.66 días para los modelos plataforma, parihuela y tradicional, respectivamente. Aquí se evidencia las distintas propiedades de las semillas al proceso de secado, que está relacionada con la composición.

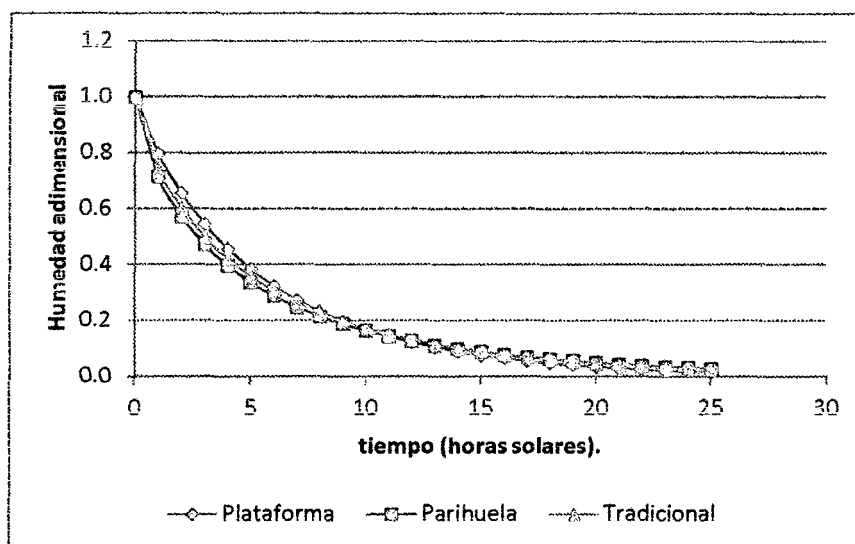


Figura 51: Humedad adimensional de las semillas ajustadas al modelo matemático de Page (Ec. 08) en función del tiempo (horas solares), correspondiente al secado de las semillas de la primera cosecha.

Segunda cosecha: en el cuadro 66 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de temperatura, humedad relativa del aire y humedad de las semillas, correspondiente al secado de la segunda cosecha.

En la figura 52 se presenta la variación de la temperatura del aire de secado en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha. Como se puede apreciar la temperatura al comenzar el día muestra un valor bajo, que aumenta conforme transcurre el día, y disminuye al terminar el mismo, se puede apreciar también que el secador tradicional presenta temperaturas más uniformes, algo que no se observa con los modelos plataforma y parihuela que muestran mayor variación, este mismo comportamiento observó (Restrepo et al., 2005).

En la mayor parte del día la temperatura del aire que fluye por el secador de plataforma es mayor seguido del modelo parihuelas y finalmente del modelo tradicional, alcanzando temperaturas máximas de 48.2°C, 37.7°C y 39.6°C, mínimas de 25.2°C, 25.3°C y 25.1°C y promedio de 35.9°C, 33.0°C y 30.3°C, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que en la latitud 06° 35', longitud

76° 19' y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilómetro de los secadores solares, la temperatura máxima promedio mensual del mes de diciembre del 2010 es 33.8°C, mínima de 21.7°C y promedio de 27.5°C, ver figura 131 del anexo 10, los cuales son muy cercanos a los valores de temperatura que se registrarán en el secador tradicional, considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento solo las horas de radiación solar del día.

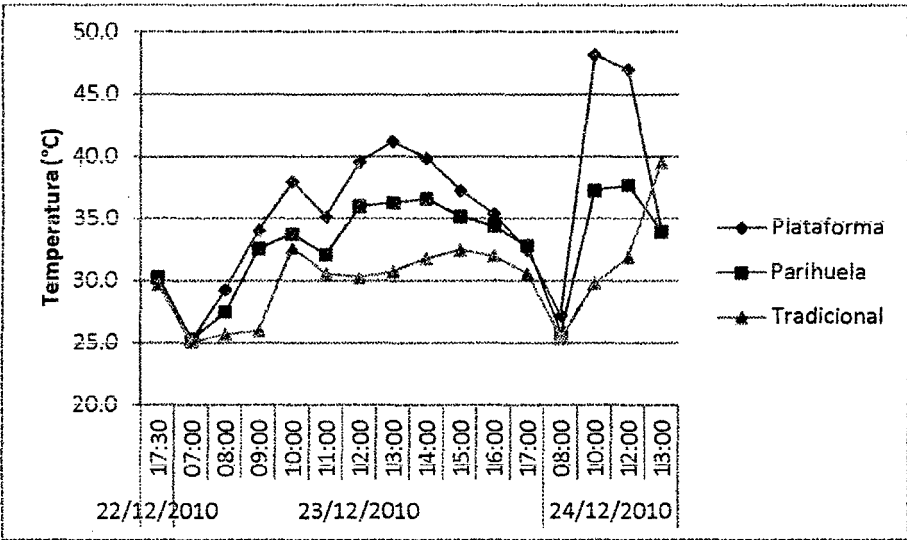


Figura 52: Temperatura de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha.

En la figura 53 se presenta la variación de la humedad relativa del aire de secado conforme transcurre el día, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha. En el comienzo del día la humedad relativa es alta y muy similar para todos los modelos, pero conforme transcurren las horas el modelo plataforma muestra los valores más bajos, seguida del modelo parihuela y muy similar el modelo tradicional, alcanzando humedades relativas mínimas de 23.8%, 40.0% y 36.5%, máximas de 74.2%, 85.1% y 79.6%, y promedias de 46.0%, 55.1% y 57.4%, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que, en la latitud 06° 35', longitud 76° 19' y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilómetro de los secadores solares, la humedad relativa promedio del mes de diciembre del 2010 fue 71%, ver figura 131 del anexo 10, el cual es muy cercano al valor de humedad relativa promedio que se registra en el secador tradicional,

considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento sólo las horas de radiación solar del día.

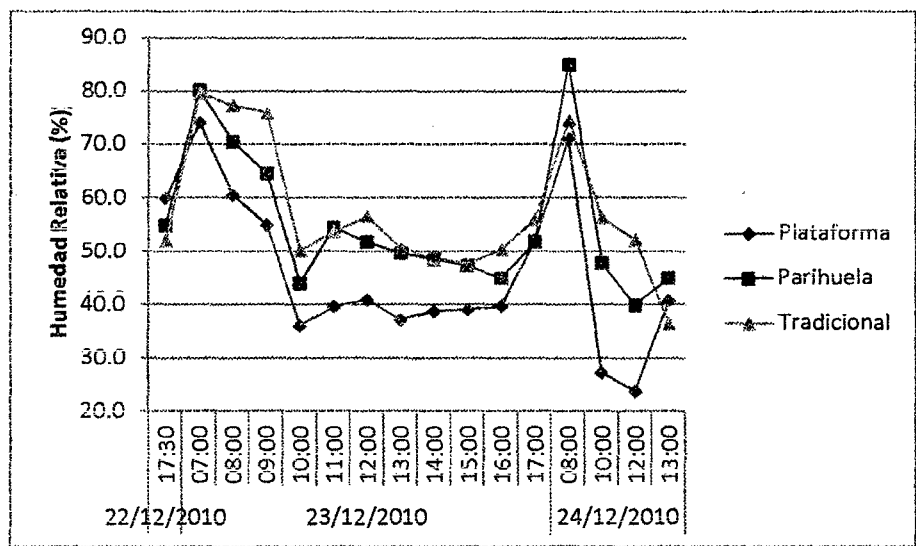


Figura 53: Humedad relativa del aire de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha.

En la figura 54 se presenta el porcentaje de humedad de las semillas en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha. En esta figura se puede apreciar la disminución de la humedad con el tiempo (horas de sol) notándose que durante el transcurso de la noche las semillas ganan humedad, debido a la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa, facilitando la ganancia de humedad, Hidaigo y Garay, 2005, también observaron este mismo comportamiento, estudiando secado solar de semillas de maíz en los mismos modelos de estudio.

En un principio se puede notar que el modelo tradicional es el que tiene ligeramente mayor velocidad de secado, que los demás modelos que muestran mucha similitud, al finalizar el segundo día de secado se puede notar que las curvas de los tres modelos se vuelven a unir, evidenciando similitud de velocidades de secado, a pesar de que el modelo plataforma tiene temperaturas más altas y humedades relativas más bajas que los modelos parihuela y tradiciones, no muestra gran diferencia, pudiendo deberse a la velocidad de la

corriente de aire que fluye por los secadores, es el modelo tradicional el que tiene la ventaja de tener mayor corriente de aire seguida del modelo parihuela y finalmente el modelo plataforma. Hidalgo y Garay (2005), observaron que el modelo de secador de plataforma presentaba mayor velocidad de secado, esto se puede deber, al tipo de materias de secado, ya que la cubierta de las semillas de maíz y Piñón blanco son muy distintas y genera mayor tiempo de secado para el primero.

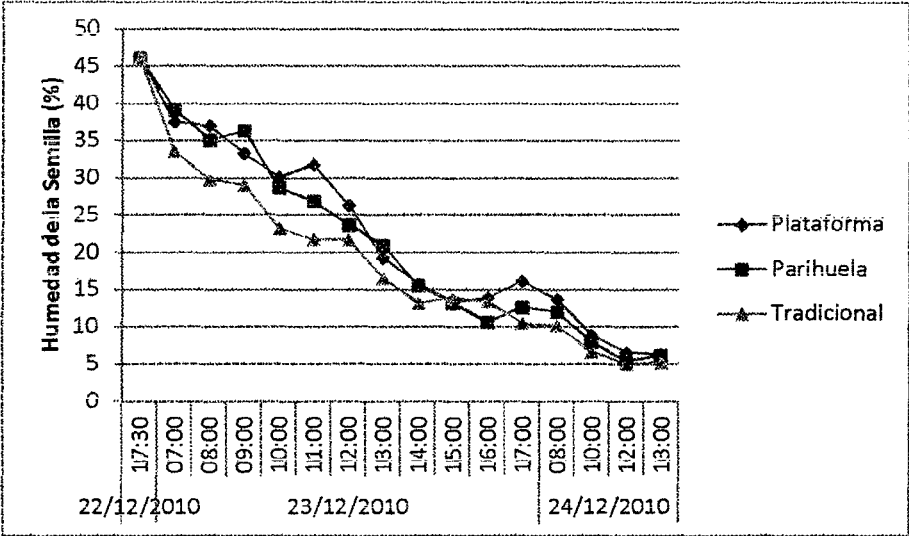


Figura 54: Humedad base húmeda de las semillas de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha.

En el cuadro 05 se presenta los parámetros de ajuste de los datos de secado solar, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha, a los modelos matemáticos de Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996) y Page modificado (White et al., 1981; Yıldız et al., 2001).

Ambos modelos presentan muy buena calidad de ajuste a los datos experimentales con coeficientes de determinación (R^2) mayores 0.95, pero el modelo Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996) muestra mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor valor de Chi cuadrada (χ^2) para los tres casos. (Sirisomboon et al. 2009) estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, evaluó 6 modelos matemáticos, logarítmico (Yagcioglu et al., 1999),

Newton (Hummedia y Sheikh, 1989), Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996), Page modificado (White et al., 1981; Yaldiz et al., 2001), Henderson y Pabis (Chhninman, 1984; Guarte, 1996), y Wang y Singh (Wang & Singh, 1978), recomendando el modelo matemático logarítmico por mostrar mayor coeficiente de determinación.

Cuadro 5. Resumen de los parámetros de las ecuaciones y ajuste de cada modelo matemático propuesto, a los datos experimentales de secado, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha.

PARAMETROS	PLATAFORMA		PARIHUELA		TRADICIONAL	
	Page	Page modif.	Page	Page modif.	Page	Page modif.
K	0.20882	0.40939	0.20303	0.4231	0.43711	0.47919
N	0.88361	0.40945	0.93144	0.4231	0.61875	0.47919
ChiSquare	0.003	0.0034	0.00164	0.00177	0.0011	0.00666
SSR	0.03896	0.04415	0.0213	0.02306	0.01426	0.08663
Correlation	0.9814	0.97889	0.99045	0.98965	0.99184	0.94934
COD(R^2)	0.96314	0.95823	0.98099	0.97942	0.98375	0.90124

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 55 se muestra la humedad adimensional, ajustada al modelo de Page, en función del tiempo de secado al sol, correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha. Como se puede notar el modelo con mayor velocidad de secado es el tradicional seguida del modelo parihuela y finalmente plataforma, durante las 10 primeras horas de secado, y posteriormente se observa mucha similitud.

El tiempo necesario, para secar las semillas de Piñón blanco desde 46.19% de humedad inicial hasta 7.00% de humedad final, calculadas por la ecuación de Page, es: 16.14 horas de sol para el modelo plataforma, 14.42 horas de sol para el modelo parihuela y 16.08 horas de sol para el modelo tradicional. Como se puede notar no existe amplia diferencia en los tiempos de secado, pero el modelo Parihuela tiene la ventaja de dos horas menos. Hidalgo y Garay (2005), reportan que el tiempo para secar las semillas de maíz hasta 13.5% de humedad es: 3.00 días, 5.30 días y 6.66 días para los modelos plataforma, parihuela y

tradicional, respectivamente. Aquí se evidencia las distintas propiedades de las semillas al proceso de secado, que está relacionada con la composición.

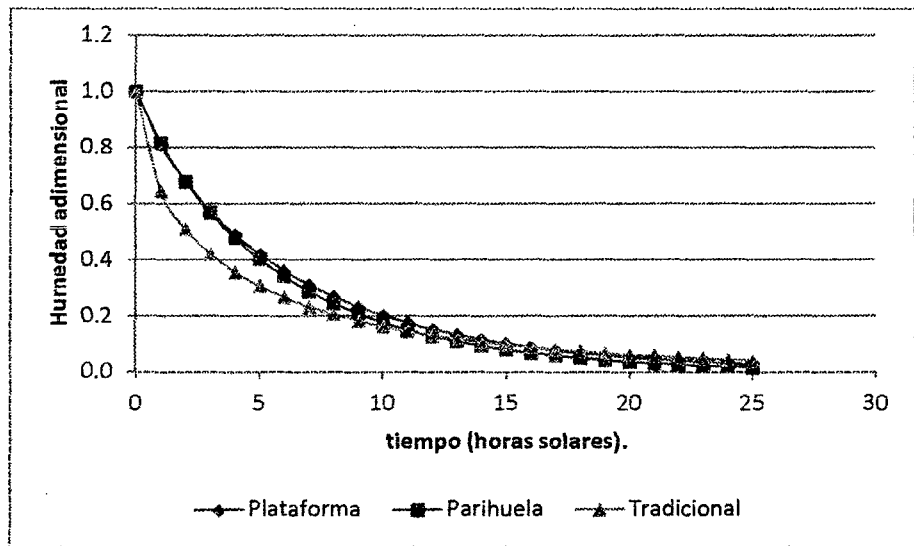


Figura 55: Humedad adimensional de las semillas ajustadas al modelo matemático de Page (Ec. 08) en función del tiempo (horas solares), correspondiente al secado de las semillas de la segunda cosecha.

Tercera cosecha: en el cuadro 67 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de temperatura, humedad relativa del aire y humedad de las semillas, correspondiente al secado de la tercera cosecha.

En la figura 56 se presenta la variación de la temperatura del aire de secado en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha. Como se puede apreciar la temperatura al comenzar el día muestra un valor bajo, que aumenta conforme transcurre el día, y disminuye al terminar el mismo, se puede apreciar también que el secador tradicional presenta temperaturas más uniformes, algo que no se observa con los modelos plataforma y parihuela que muestran mayor variación, este mismo comportamiento observo Restrepo et al., (2005).

En la mayor parte del día la temperatura del aire que fluye por el secador de plataforma es mayor seguido del modelo parihuelas y finalmente del modelo tradicional, alcanzando temperaturas máximas de 46.0°C, 38.4°C y 36.1°C,

mínimas de 26.8°C, 24.4°C y 24.5°C y promedio de 35.8°C, 33.2°C y 32.2°C, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que en la latitud 06° 35', longitud 76° 19' y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilómetro de los secadores solares, la temperatura máxima promedio mensual del mes de diciembre del 2010 es 33.8°C, mínima de 21.7°C y promedio de 27.5°C, ver figura 131 del anexo 10, los cuales son muy cercanos a los valores de temperatura que se registran en el secador tradicional, considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento solo las horas de radiación solar del día.

Durante el transcurso del día 29/12/2010 se puede notar que las temperaturas son similares para los tres modelos, en particular esta fecha se registro lluvia, durante la mañana y por la tarde se mantuvo sombreado. El secado comienza por la tarde (15:00 horas).

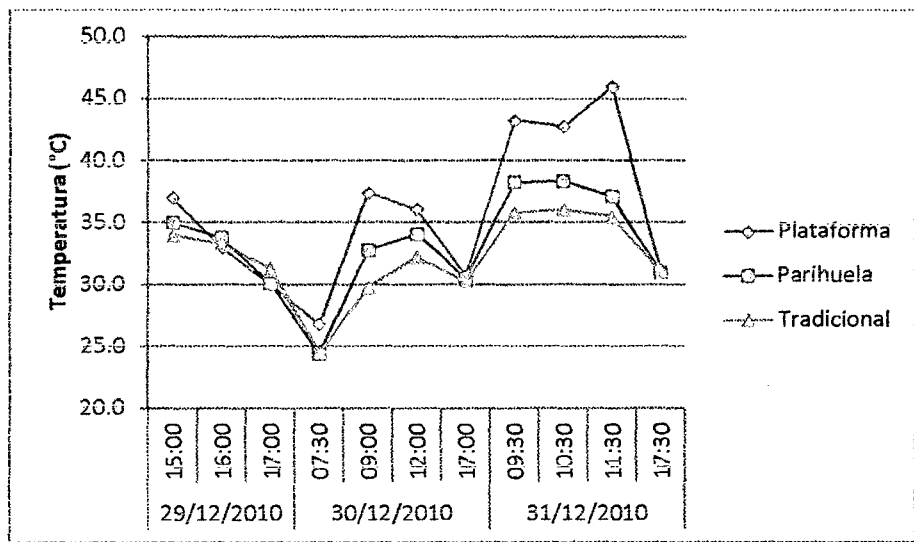


Figura 56: Temperatura de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha.

En la figura 57 se presenta la variación de la humedad relativa del aire de secado conforme transcurre el día, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha. El primer día de secado (29/12/2010) es el modelo tradicional el que presenta valores menores de humedad relativa del aire por el días sombrío y la lluvia que se registro este día. El segundo y tercer día el

comportamiento es similar a las anteriores teniendo el modelo plataforma humedades relativas menores seguidas del modelo parihuela y finalmente tradicional, alcanzando humedades relativas mínimas de 24.5%, 36.6% y 41.5%, máximas de 78.3%, 85.5% y 77.8%, y promedias de 47.4%, 54.4% y 51.4%, respectivamente. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la dirección regional de San Martín, informa que, en la latitud 06° 35', longitud 76° 19' y altitud 230 m.s.n.m., a medio kilometro de los secadores solares, la humedad relativa promedio del mes de diciembre del 2010 fue 71%, ver figura 131 del anexo 10, el cual es muy cercano al valor de humedad relativa promedio que se registra en el secador tradicional, considerando que SENAMHI promedia los datos de la noche y en el experimento solo las horas de radiación solar del día.

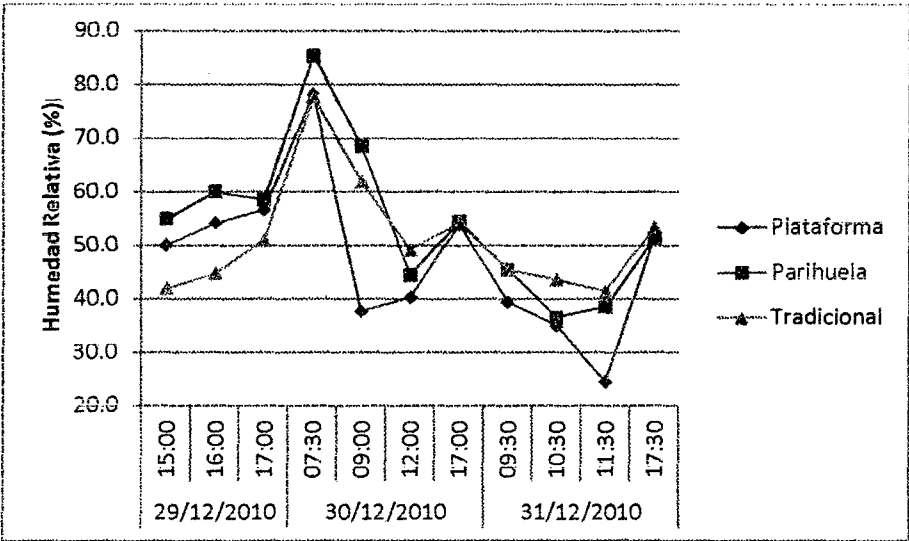


Figura 57: Humedad relativa del aire de secado de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha.

En la figura 58 se presenta el porcentaje de humedad de las semillas en función del tiempo, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha. En esta figura se puede apreciar la disminución de la humedad con el tiempo (horas de sol) notándose que durante el transcurso de la noche las semillas ganan humedad, debido a la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa, facilitando la ganancia de humedad, Hidalgo y Garay (2005),

también observaron este mismo comportamiento, estudiando secado solar de semillas de maíz en los mismos modelos de estudio.

El comportamiento de la curva en el primer día de secado, muestra una tendencia que no es la habitual y existiendo similitud en las curvas, evidenciando el comportamiento del día (con lluvia y sombra), la tendencia vuelve a tomar forma al comienzo del segundo día de secado notándose que la curva del modelo plataforma esta ligeramente con velocidad de secado más baja que las del modelo tradicional y parihuela que evidencian mayor velocidad de secado, esto a pesar de que el modelo plataforma tiene temperaturas más altas y humedades relativas más bajas que los modelos parihuela y tradicionales, pudiendo deberse a la velocidad de la corriente de aire que fluye por los secadores, es el modelo tradicional el que tiene la ventaja de tener mayor corriente de aire seguida del modelo parihuela y finalmente el modelo plataforma. Hidalgo y Garay (2005), observaron que el modelo de secador de plataforma presentaba mayor velocidad de secado, esto se puede deber, al tipo de materias de secado, ya que la cubierta de las semillas de maíz y Piñón blanco son muy distintas y genera mayor tiempo de secado para el primero.

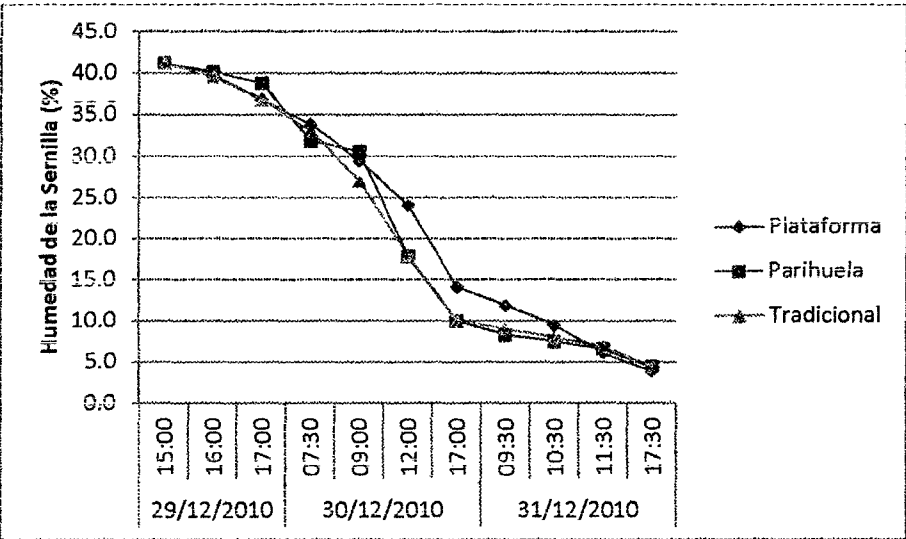


Figura 58: Humedad base húmeda de las semillas de los modelos de secador solar en función de la hora y fecha, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha.

En el cuadro 06 se presenta los parámetros de ajuste de los datos de secado solar, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha, a los modelos matemáticos de Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996) y Page modificado (White et al., 1981; Yaidiz et al., 2001).

Ambos modelos presentan muy buena calidad de ajuste a los datos experimentales con coeficientes de determinación (R^2) mayores 0.98, pero el modelo Page, Zhang y Litchfield, (1991); Guarte, (1996) muestra mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor valor de Chicuadrada (χ^2) para los tres casos. Sirisomboon et al. (2009) estudiando el secado de *Jatropha curcas* a 40°C, 60°C y 80°C, evaluó 6 modelos matemáticos, logarítmico, Yagcioglu et al., (1999), Newton (Hummedia y Sheikh, 1989), Page (Zhang y Litchfield, 1991; Guarte, 1996), Page modificado (White et al., 1981; Yaidiz et al., 2001) Henderson y Pabis (Chhninman, 1984; Guarte, 1996), y Wang y Singh (Wang & Singh, 1978), recomendando el modelo matemático logarítmico por mostrar mayor coeficiente de determinación.

Cuadro 6. Resumen de los parámetros de las ecuaciones y ajuste de cada modelo matemático propuesto, a los datos experimentales de secado, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha.

PARAMETROS	PLATAFORMA		PARIHUELA		TRADICIONAL	
	Page	Page modif.	Page	Page modif.	Page	Page modif.
K	0.10632	0.37159	0.10201	0.393	0.13797	0.40411
N	1.12952	0.37159	1.22508	0.393	1.0945	0.40411
ChiSquare	0.00122	0.00186	0.00121	0.00289	0.00144	0.00178
SSR	0.00953	0.01305	0.0085	0.02026	0.01007	0.01244
Correlation	0.99611	0.99403	0.99644	0.9915	0.99551	0.99445
COD(R^2)	0.99223	0.9881	0.9929	0.98307	0.99104	0.98894

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 59 se muestra la humedad adimensional, ajustada al modelo de Page, en función del tiempo de secado al sol, correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha. Como se puede notar el modelo con mayor velocidad de secado es el tradicional seguida del modelo parihuela y finalmente

plataforma, durante las 20 primeras horas de secado, y posteriormente se observa mucha similitud.

El tiempo necesario, para secar las semillas de Piñón blanco desde 41.22% de humedad inicial hasta 7.00% de humedad final, calculadas por la ecuación de Page, es: 14.83 horas de sol para el modelo plataforma, 12.43 horas de sol para el modelo parihuela y 12.72 horas de sol para el modelo tradicional. Como se puede notar no existe amplia diferencia en los tiempos de secado, pero el modelo Parihuela y tradicional tienen la ventaja de dos horas menos sobre el modelo plataforma. Hidalgo y Garay (2005), reportan que el tiempo para secar las semillas de maíz hasta 13.5% de humedad es: 3.00 días, 5.30 días y 6.66 días para los modelos plataforma, parihuela y tradicional, respectivamente. Aquí se evidencia las distintas propiedades de las semillas al proceso de secado, que está relacionada con la composición.

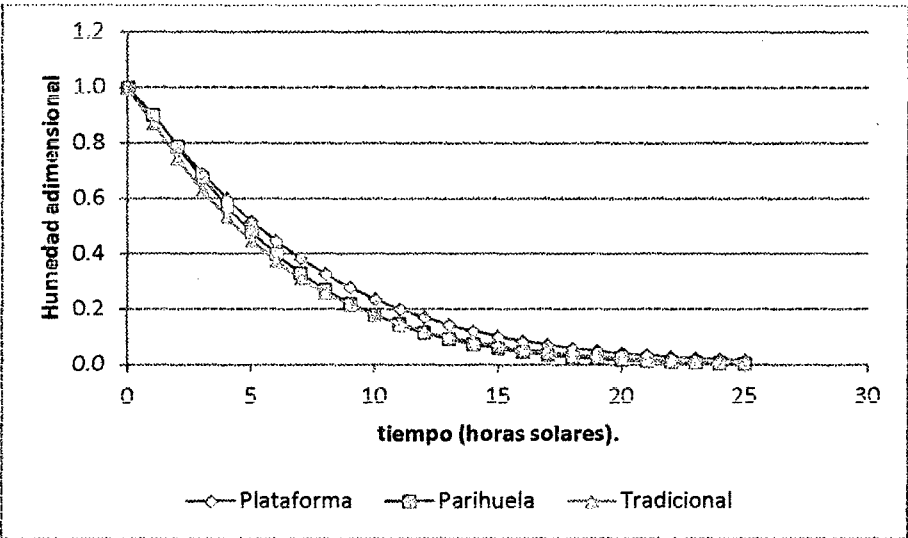


Figura 59: Humedad adimensional de las semillas ajustadas al modelo matemático de Page (Ec. 08) en función del tiempo (horas solares), correspondiente al secado de las semillas de la tercera cosecha.

4.2.3. Calidad de la semilla seca:

Análisis biométricos de la semilla. En los cuadros 68, 69 y 70 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de las medidas biométricas de la semilla de Piñón blanco.

En la figura 60 se presentan los datos promediados de los pesos de la semillas, almendra y testa por modelo desecador solar, se puede notar que estadísticamente la influencia del modelo de secador solar es no significativo. Los valores que se reportan son muy similares a otros reportes como del (INIA – El Porvenir – Laboratorio de Postcosecha y agroindustria, 2010) que presenta en la ficha técnica del ecotipo totorillaicó, cuadro 108 del anexo 07, 0.7820 g de peso para la semilla.

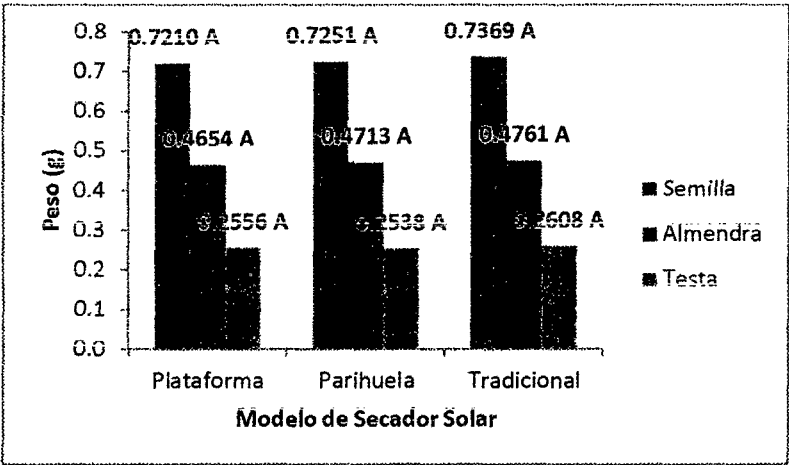


Figura 60: Peso (g) de la semilla, almendra y testa en función del modelo de secador solar.

En la figura 61 se muestra porcentualmente la relación de la almendra y el de la testa con referencia a la semilla.

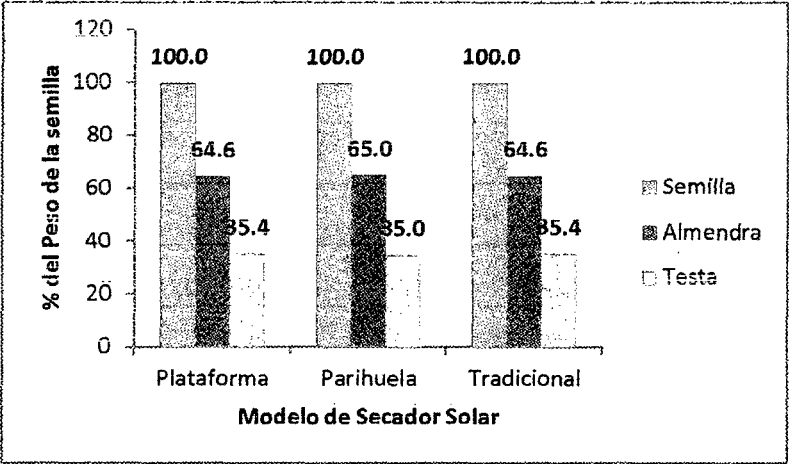


Figura 61: Porcentaje de peso de la semilla, almendra y testa en función del modelo de secador solar.

En la figura 62 se presentan las medidas de longitud, ancho y espesor de las semillas en función de los secadores. La influencia del modelo de secador solar en la dimensiones de la semillas en no significativo.

El valor promedio de longitud de las semillas es de 18.185 mm, del ancho 11.55 mm y del espesor 8.68 mm. Medidas que se asemejan a las descritas en la ficha técnica del ecotipo totorillaico, cuadro 108 del anexo 07, 19.85 mm y 12.45 de longitud y diámetro.

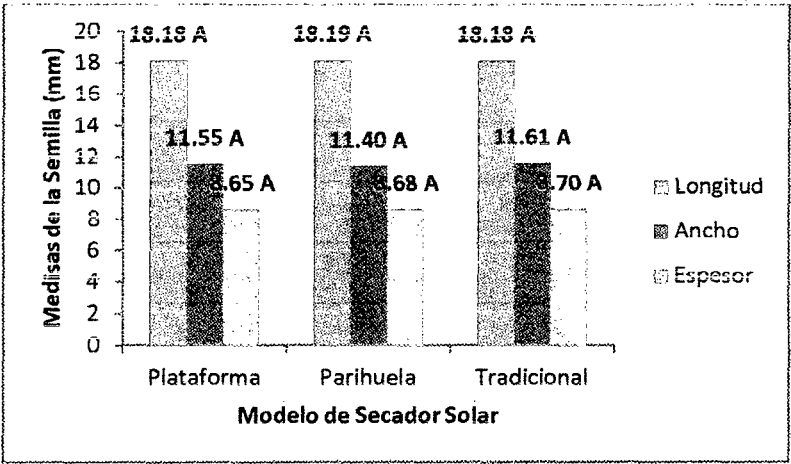


Figura 62: Medidas de la semilla en función del modelo de secador solar.

En la figura 63 se presentan las medidas de longitud, ancho y espesor de la almendra en función de los secadores. La influencia del modelo de secador solar en la dimensiones de la almendra es no significativo. El valor promedio de longitud de la almendra es de 14.70 mm, del ancho 9.60 mm y del espesor 7.27 mm. Medidas que se asemejan a las descritas en la ficha técnica cuadro 108 del anexo 07, siendo 16.05 mm y 10.20 de longitud y diámetro.

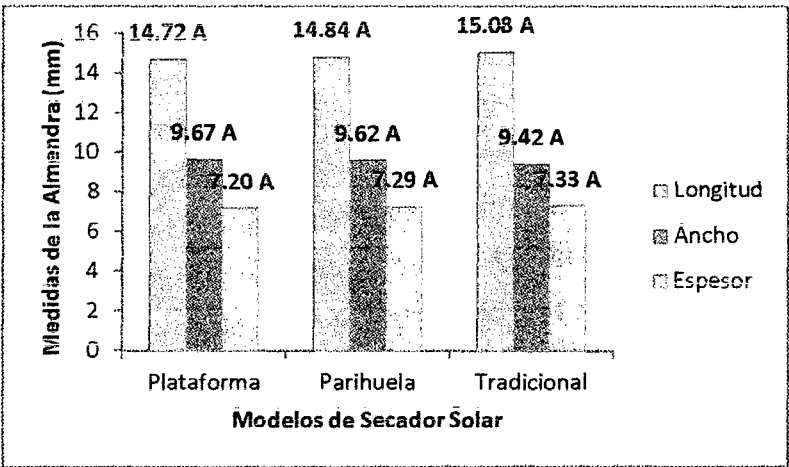


Figura 63: Medidas de la almendra en función del modelo de secador solar.

Contenido de grasa total (g aceite/100 g almendra seca). En el cuadro 71 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del contenido de grasa total de la almendra, en la figura 64 se presenta los valores promedios del porcentaje de contenido de grasa total, de las almendras, en función del modelo de secador solar, siendo 50.05, 48.35 y 49.22 Kg aceite/Kg almendra seca, para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar** es **no significativo**, del **Lugar de cosecha** es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.7993$, C.V. = 3.3636 y $\% \text{ Grasa Total}_{\text{prom}} = 49.21$), ver cuadro 72 del anexo 03.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 64, también observar el cuadro 73.

Como se muestra los factores de estudio de este experimento no afectaron el valor del contenido de grasa total de la almendra de Piñón blanco, sin embargo los valores que se reportan son muy similares a otros reportes como del (INIA – El Porvenir – Laboratorio de Postcosecha y agroindustria, 2010) que presenta en la ficha técnica del ecotipo Totorillayco, cuadro 108 del anexo 07, el mismo ecotipo de estudio, 50.29%.

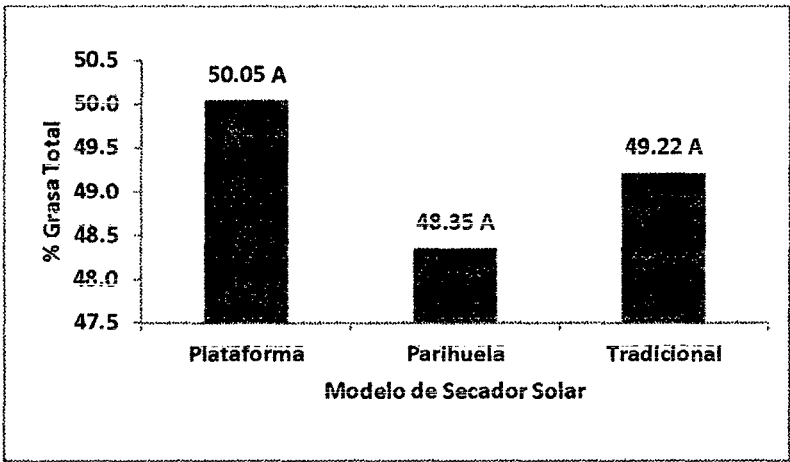


Figura 64: Contenido de Grasa Total promedio (g aceite/100 g almendra seca) en función del modelo de secador solar.

4.2.4. Calidad del aceite:

Índice de acidez (mg KOH/g aceite): en el cuadro 74 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del índice de acidez del aceite, en la figura 65 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 0.938, 0.867 y 0.857 mg KOH/g aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuella y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar es no significativo**, del **Lugar de cosecha es**

significativo. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.6593$, C.V. = 11.33 y $IA_{prom} = 0.8878$), ver cuadro 75 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 65, también observar el cuadro 76 del anexo 03.

La norma técnica de aceite para producción de biodiesel, (V DIN 51 605, 2007) anexo 08, reporta un valor máximo aceptable de 2.000 mg KOH/g aceite. El laboratorio (Analytik Service Gesellschaft, 2010) anexo 08, reporta que el índice de acidez promedio, en una muestra de aceite proveniente de frutos de Piñón Blanco maduros ecotipo Totorillayco, es de 0.2280 mg KOH/g aceite. Los valores de índice de acidez que se reportan en este experimento están dentro de los valores aceptables para este parámetro de calidad de aceite para biodiesel.

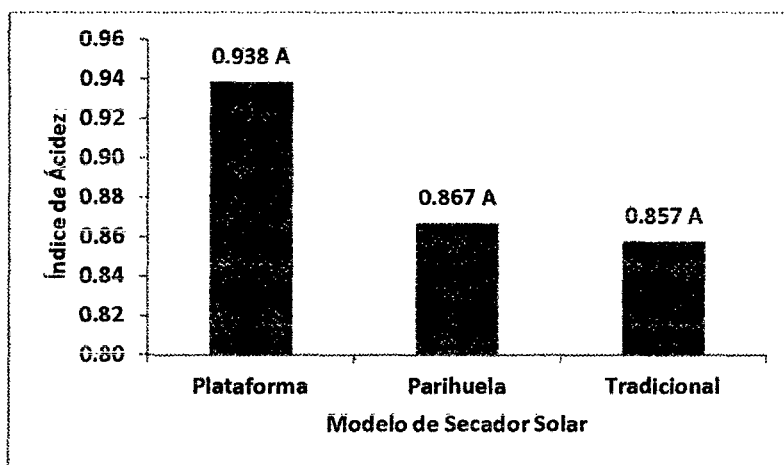


Figura 65: Índice de Acidez promedio (mg KOH/g aceite) en función del modelo de secador solar.

Índice de peróxido (mg O_2 /Kg aceite): en el cuadro 77 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del índice de peróxido del aceite, en la figura 66 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 0.533, 0.879 y 0.854 mg O_2 /Kg aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar es significativo**, del **Lugar de cosecha es significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.8028$, C.V. = 14.53 y $IP_{prom} = 0.7555$), ver cuadro 78 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de los modelos Parihuela y Tradicional es no significativa, en cambio el del modelo Plataforma es significativa respecto a los otros dos modelos, como se muestra en la figura 66, también observar cuadro 79 del anexo 03.

Según (Castillo, 2006), La velocidad de oxidación crece con un incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre). El índice de peróxido relativamente elevado del modelo parihuela puede deberse a la presencia de la malla metálica con la que se construyó las parihuelas. En cambio el del modelo tradicional puede deberse a la elevada iluminación, puesto que las semillas están directamente secadas al sol, la luz solar sumada al flujo de aire pueden elevar el valor del índice de peróxido. Por parte del secador de plataforma si bien las temperaturas en el interior pueden alcanzar hasta los 56.2°C , en el experimento de secado en laboratorio se ha demostrado que esta es una temperatura que no afecta este índice en gran manera, y la manta térmica plástica impide el paso de luz solar directa y además, el diseño ocasiona que el flujo de aire sea menos que los modelos de parihuela y tradicional.

La institución, BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, reporta que el índice de peróxido de aceite de Piñón blanco, es $4.000 \text{ mg O}_2/\text{Kg aceite}$. Los valores de índice de peróxido que se reportan en este experimento están dentro de los valores aceptables para este parámetro de calidad de aceite, para biodiésel.

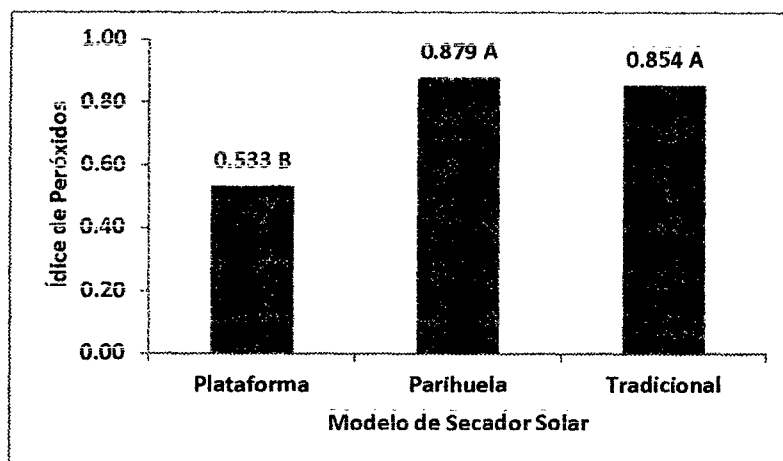


Figura 66: Índice de Peróxido promedio (mg O₂/Kg aceite) en función del modelo de secador solar.

Índice de yodo (g Yodo/100 g aceite): en el cuadro 80 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del índice de yodo del aceite, en la figura 67 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 97.78, 91.56 y 93.58 g Yodo/100 g aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar** es **significativo**, del **Lugar de cosecha** es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.6221$, C.V. = 2.9907 y $IY_{prom} = 94.31$), ver cuadro 81 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de los modelos Parihuela y Tradicional es no significativa, en cambio el del modelo Plataforma es significativa, como se muestra en la figura 67, también observar el cuadro 82 del anexo 03.

Un alto índice de yodo puede indicar menor punto de fusión y mejores propiedades de flujo en frío. Bajo índice de yodo indica mejor estabilidad a la oxidación y polimerización (menor riesgo de formación de sólidos), y mayor número de cetano (mejor calidad de combustión) (Castillo, 2006).

V DIN 51 605 (2007) anexo 08, reporta un rango aceptable de 95 – 125 g Iodo/ 100 g aceite, el laboratorio Alemán Analytik Service Gesellschaft (2010) anexo 08, precisa un valor promedio de 101 g Yodo/100 g aceite y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, reporta 110.5 g Yodo/100 g aceite.

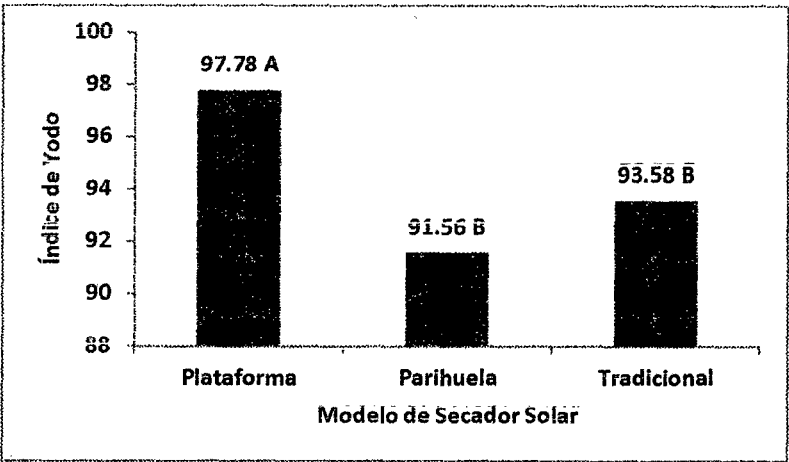


Figura 67: Índice de Yodo promedio (g Yodo/100 g aceite) en función del modelo de secador solar.

Índice de saponificación (mg KOH/g aceite): en el cuadro 83 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del índice de saponificación del aceite, en la figura 68 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 190.60, 194.21 y 189.07 mg KOH/g aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar es no significativo, del Lugar de cosecha es no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.2307$, C.V. = 2.3067 y $IS_{prom} = 191.29$), ver cuadro 84 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 68, también observar el cuadro 85 del anexo 03.

Como se muestra los factores de estudio de este experimento no afectaron el valor del índice de saponificación del aceite de Piñón blanco, sin embargo los valores que se reportan son muy similares a otros reportes como BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, 195.0 mg KOH/g aceite.

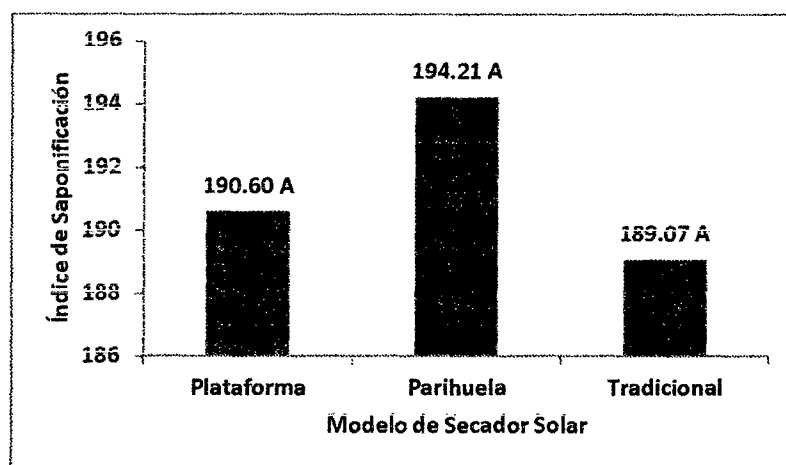


Figura 68: Índice de Saponificación promedio (mg KOH/g aceite) en función del modelo de secador solar.

Densidad a 15°C (g/ml): en el cuadro 86 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de la densidad a 15°C, del aceite, en la figura 69 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 0.913899, 0.913491 y 0.914670 g/ml para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar es no significativo, del Lugar de cosecha es significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.5554$, C.V. = 0.2514 y $Densidad_{prom} = 0.914020$), ver cuadro 87 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 69, también observar cuadro 88 del anexo 03.

Como se muestra los factores de estudio de este experimento no afectaron el valor de la densidad del aceite de Piñón blanco, sin embargo los valores que se reportan son muy similares a otros reportes como la del laboratorio Alemán Analytik Service Geseiischaft (2010) anexo 08 anexos, que precisa un valor promedio de 0.9192 g/cm³ y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, reporta 0.919 g/cm³. Cabe indicar que todos los valores de densidad están determinados a 15°C. V DIN 51 605 (2007) anexo 08 anexos, reporta un rango de entre 0.900 – 0.930 g/cm³.

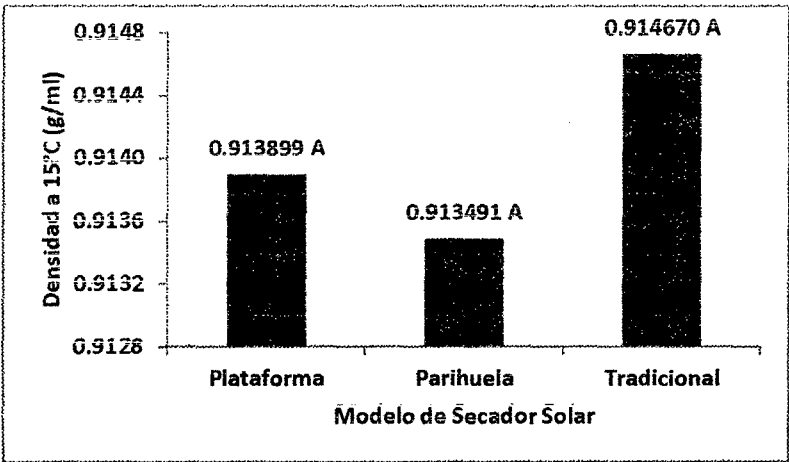


Figura 69: Densidad promedio a 15°C (g/ml) en función del modelo de secador solar.

Viscosidad cinemática a 40°C (mm²/s): en el cuadro 89 del anexo 03, se presentan los datos experimentales de la viscosidad cinemática a 40°C, del aceite, en la figura 70 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 34.94, 34.69 y 34.19 mm²/s para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modeio de secador solar es no significativo, del Lugar de cosecha es no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.2330$, C.V. = 4.0730 y Viscosidad_{prom} = 34.60), ver cuadro 90 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 70, también observar cuadro 91 del anexo 03.

V DIN 51 605 (2007) anexo 08, reporta un máximo de 36 mm²/s. Los valores que se reportan están por debajo del máximo indicado por la norma técnica y son muy similares a otros reportes como la del laboratorio Alemán Analytik Service Gesellschaft (2010) anexo 08, que precisa un valor promedio de 35.25 mm²/s y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, reporta 33.6 mm²/s. Cabe indicar que todos los valores de viscosidad están determinados a 40°C.

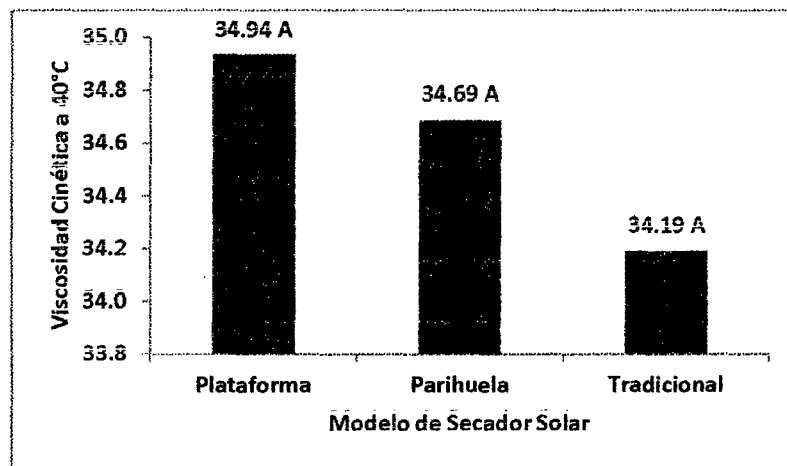


Figura 70: Viscosidad cinemática promedio a 40°C (mm²/s) en función del modelo de secador solar.

Punto de humo (°C): en el cuadro 92 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del punto de humo, del aceite, en la figura 71 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 234.33, 235.44 y 226.00 °C para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar** es **significativo**, del **Lugar de cosecha** es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.7252$, C.V. = 2.7430 y Punto de Humo_{prom} = 231.93), ver cuadro 93 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias del modelo plataforma y parihuela es no significativa, y el de tradicional es diferente significativamente, como se muestra en la figura 71, también observar cuadro 94 del anexo 03.

El punto de humo también es importante para la calidad del aceite a ser utilizado para la producción de biodiesel, pues un valor elevado de este parámetro favorece la calidad del biodiesel que se obtendrá, aumentando el punto de inflamación de este último. Este parámetro está relacionado con la volatilidad de las moléculas que conforman la materia grasa con las cadenas cortas o largas.

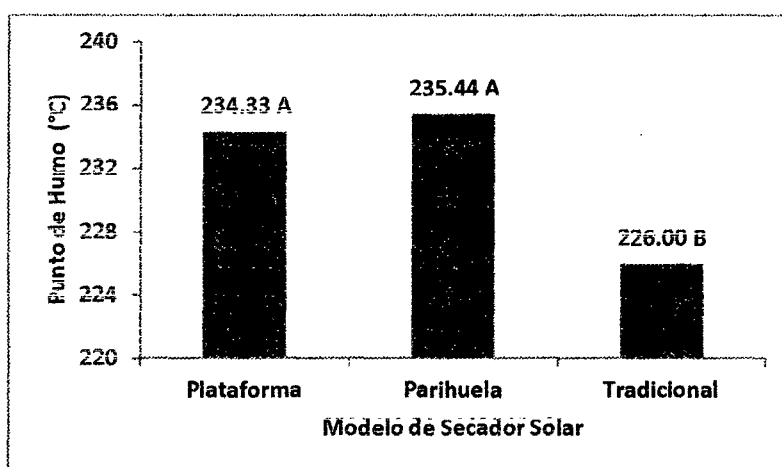


Figura 71: Punto de Humo promedio (°C) en función del modelo de secador solar.

Contenido de impurezas (g/100 g aceite): en el cuadro 95 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del contenido de impurezas, del aceite, en la figura 72 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 0.7786, 0.7275 y 0.9286 g/100 g aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar** es **significativo**, del **Lugar de cosecha** es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.5007$, C.V. = 14.25 y $\% \text{ Impurezas}_{\text{prom}} = 0.8115$), ver cuadro 96 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias del modelo plataforma y parihuela es no significativa, y el de tradicional es diferente significativamente, como se muestra en la figura 72, también observar cuadro 97 del anexo 03.

Menor contenido de impurezas favorece la calidad del aceite, puesto que si estas, llegan al motor podrían obstruir valvular inyectores, filtro y otros, disminuyendo la vida útil del motor.

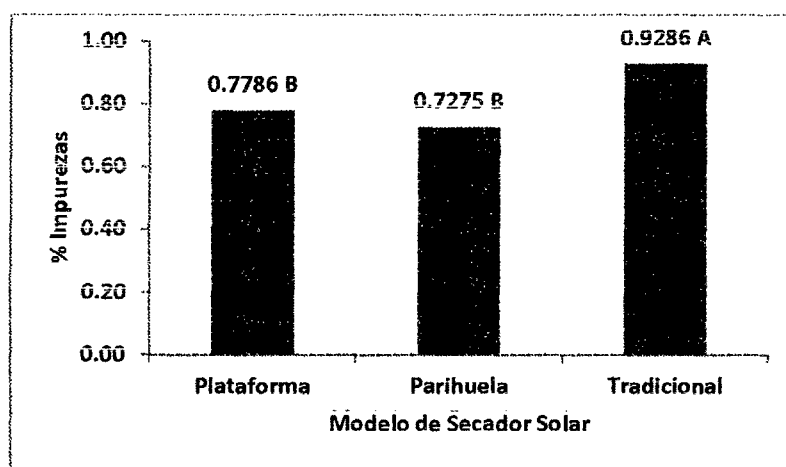


Figura 72: Contenido de Impurezas promedio (g/100 g aceite) en función del modelo de secador solar.

Humedad y materias volátiles (mg agua/Kg aceite): en el cuadro 98 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del contenido de humedad y materias volátiles, del aceite, en la figura 73 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 525.06, 486.04 y 604.85 mg agua/Kg aceite para los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar es significativo**, del **Lugar de cosecha es no significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.3135$, C.V. = 16.40 y $\text{Humedad}_{\text{prom}} = 538.65$), ver cuadro 99 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias del modelo plataforma y parihuela es no significativa, el de plataforma y tradicional es no significativa, y el de parihuela y tradicional es significativo, como se muestra en la figura 61, también observar cuadro 100 del anexo 03.

Durante la transesterificación, la presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y consumir el catalizador, reduciendo su eficiencia. La presencia de agua tiene un efecto aún más negativo que la de ácidos grasos libres (Osorio, 1977).

V DIN 51 605 (2007) anexo 08, reporta un máximo de 750 mg H₂O/Kg aceite. Todos los valores son inferiores al máximo reportado en la norma técnica y muy similar a otros reportes como la del laboratorio Alemán Analytik Service Gesellschaft (2010) anexo 08, que precisa un valor promedio de 1165 mg H₂O/Kg aceite y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, 500 mg H₂O/Kg aceite.

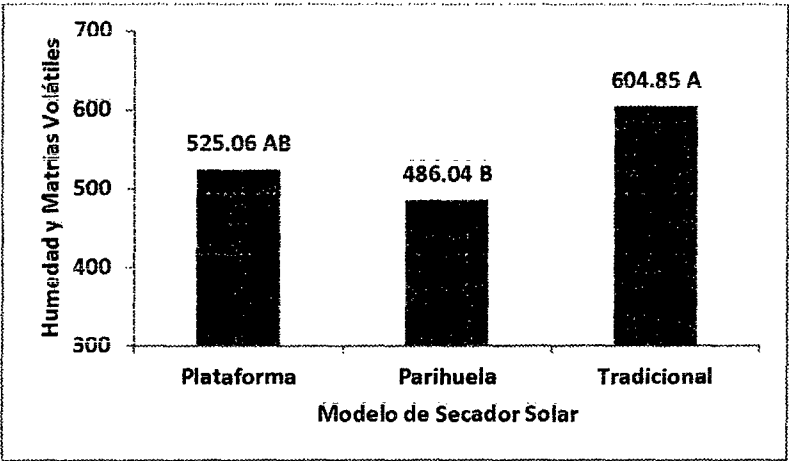


Figura 73: Humedad y Materias Volátiles promedio (mg agua/Kg aceite) en función del modelo de secador solar.

Cenizas totales (g cenizas/100 g aceite): en el cuadro 101 del anexo 03, se presentan los datos experimentales del contenido de cenizas totales, del aceite, en la figura 74 se presenta los valores promedios en función del modelo de secador solar, siendo 0.008528, 0.009403 y 0.009178 g cenizas/100 g aceite para

los modelos de secador solar Plataforma, Parihuela y Tradicional, respectivamente.

El análisis de varianza, al 95% de confianza, nos indica que: el efecto del **modelo de secador solar** es **no significativo**, y del **Lugar de cosecha** es **significativo**. Los parámetros del ANVA fueron; ($R^2 = 0.4886$, C.V.= 28.20 y $\% \text{ Cenizas}_{\text{prom}} = 0.009036$), ver cuadro 102 del anexo 3.

La prueba de Tuckey para el efecto del modelo de secador solar indica que la diferencia entre las medias de todos los niveles es no significativa, como se muestra en la figura 74, también observar cuadro 103 del anexo 03.

V DIN 51 605 (2007) anexo 08, reporta un máximo de 0.01 %. Todos los valores son inferiores al máximo reportado en la norma técnica y muy similar a otros reportes como la del laboratorio Alemán Analytik Service Gesellschaft (2010) anexo 08, que precisa un valor inferior a 0.001% y BIOTEL (2010) cuadro 105 del anexo 05, 0.002%.

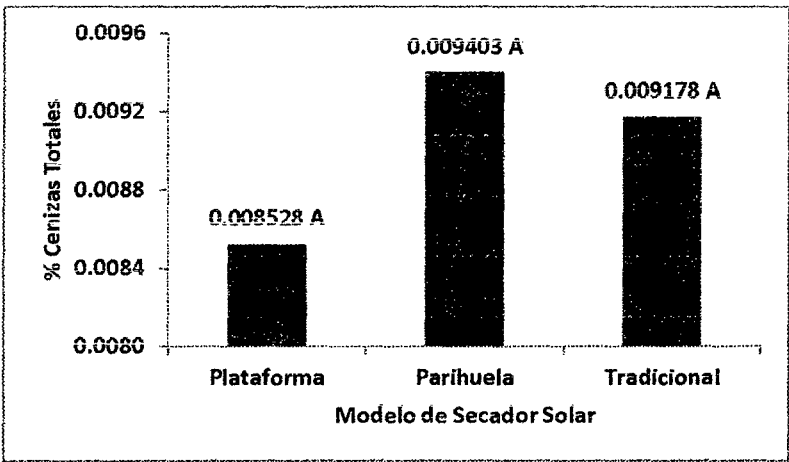


Figura 74: Contenido de Cenizas Totales promedio (g cenizas/100 g aceite) en función del modelo de secador solar.

En el cuadro 07 se presenta un resumen del total de análisis realizado en el experimento de evaluación de secadores solares y su influencia en la calidad del aceite de Piñón blanco. Como se puede apreciar se muestra los datos

promediados referente a los análisis realizados en el aceite y semillas que se secaron en los modelos planteados, también se presenta análisis de calidad realizados en aceite y semilla secados en el mismo árbol, cabe indicar que los agricultores practican este método, lo dejan secar el fruto en el mismo árbol y una vez esto, lo cosechan. Así mismo se muestra análisis de calidad realizados en semillas secadas en el suelo, estas semillas fueron recogidas del suelo, producto de la caída de la planta de Piñón blanco, los agricultores también practican este método de cosecha, pues las semillas que se encuentran en el suelo también las recolectan y las unen al resto de la cosecha.

Pues bien, en análisis de calidad de contenido de grasa total se puede apreciar una diferencia de hasta 4% para las semillas secadas en la planta, y de hasta 7% para las semillas secadas en el suelo.

En el índice de acidez también se observa gran diferencia, de hasta 0.6 mg KOH/g aceite para las semillas secadas en la planta y además de estar cerca del límite óptimo de acidez para la producción de biodiesel, en cuanto a las semillas que se secaron en el suelo el índice de acidez supera el límite óptimo para este parámetro.

En cuanto al índice de peróxidos solo las semillas secadas en el suelo presentan un elevado valor de este parámetro.

El punto de humo también es importante para la calidad del aceite a ser utilizado para la producción de biodiesel, pues un valor elevado de este parámetro favorece la calidad del biodiesel que se obtendrá. Está relacionado con la volatilidad de las moléculas que conforman la materia grasa con las cadenas cortas o largas. Existe una diferencia de hasta 32.2°C respecto a las semillas secadas en la planta, y de 50.7°C para las semillas secadas en el suelo, cual se debe al elevado índice de peróxidos.

Cuadro 7. Comparación de análisis de control de calidad en aceite de Piñón blanco.

Análisis	Secadores Solares			Secada en la Planta	Secadas en el Suelo	Especificaciones	
	Plataforma	Parihuela	Tradicional			Límites	Fuente
Contenido de Grasa (%)	50.05	48.35	49.22	45.90	43.17	50.29	INIA-El Porvenir
Índice de Acidez (mg KOH/g)	0.9384	0.8669	0.8574	1.4544	2.2998	Máx. 2.00	V DIN 51 605
Índice de Peróxidos (mg O ₂ /Kg)	0.5333	0.8790	0.8541	0.8149	1.2338	Máx. 4	BIOTEL
Índice de Yodo (g I ₂ /100 g)	97.78	91.56	93.58	94.94	92.30	95 - 125	V DIN 51 605
Índice de Saponificación (mg KOH/g)	190.60	194.21	189.07	189.85	191.69	195	BIOTEL
Densidad a 15°C (g/cm ³)	0.9139	0.9135	0.9147	0.9152	0.9155	0.900 - 0.930	V DIN 51 605
Viscosidad a 40°C	34.94	34.69	34.19	34.22	33.76	Máx. 36	V DIN 51 605
Punto de Humo (°C)	234.3	235.4	226.0	203.2	184.7		
Contenido de Impurezas (%)	0.7786	0.7275	0.9286	0.7240	0.7068		
Humedad y Materias Volátiles (mg/Kg)	525.06	486.04	604.85	658.71	577.11	Máx. 750	V DIN 51 605
Contenido de Cenizas (%)	0.008528	0.009403	0.009178	0.009468	0.009532	Máx. 0.01	V DIN 51 605

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Determinación de parámetros de almacenamiento óptimo de las semillas de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.).

Contenido de humedad de equilibrio. La humedad inicial de las semillas de *J. curcas* fue 4%, 14%, 24%, en base húmeda. La figura 75 muestra los datos de humedad experimental determinados en el equilibrio, en función de la actividad de agua para tres temperaturas de trabajo (15°C, 25°C y 35 °C); se obtuvieron isothermas de tipo II de forma sigmoidea según la clasificación de Brunauer, al igual que la mayoría de las semillas (Martínez y Chiralt, 1996).

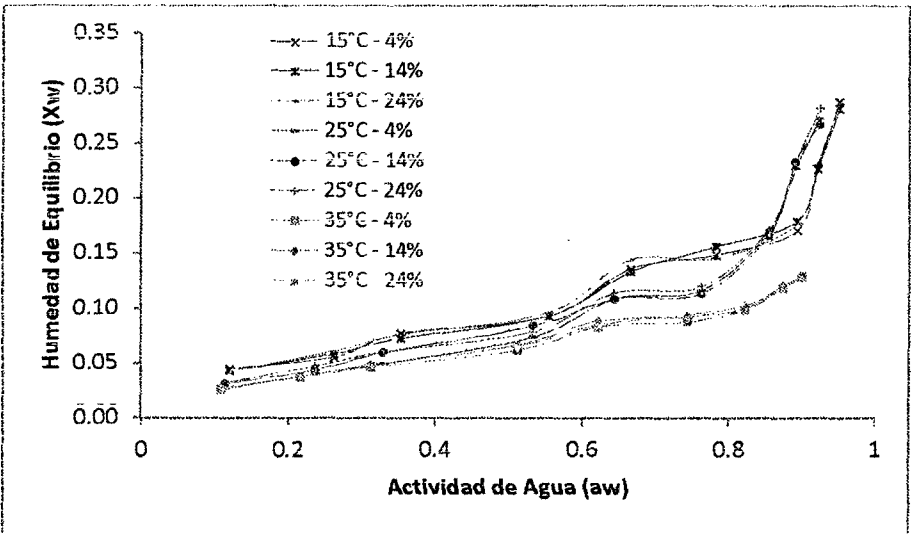


Figura 75: Contenido de humedad de equilibrio experimental de la semilla de Piñón Blanco para tres temperaturas (15 ° C, 25 ° C y 35 ° C) y tres contenidos de humedad inicial (4%, 14% y 24%) base húmeda.

Se puede apreciar una región recta de pendiente ligeramente positiva, para el rango de actividad de agua de 0.10 a 0.70, que la teoría de BET (Brunauer et al., 1938) supone corresponden a una adsorción de varias capas moleculares. En esta región también se puede apreciar que cuando a una actividad de agua constante se disminuye la temperatura el contenido de humedad en el equilibrio aumenta, este mismo comportamiento observo (Arana et al., 1987) al determinar isothermas de sorción a tres temperaturas en maíz y trigo. Este comportamiento tiene importancia durante el almacenamiento ya que si se disminuye la temperatura, en principio se obtiene la ventaja de que a la misma actividad de

agua se puede almacenar las semillas con mayor humedad, lo cual permite eliminar menor cantidad de agua y minimizar los daños térmicos durante el secado.

En cambio al disminuir la humedad inicial de las semillas, para una misma actividad de agua, el contenido de humedad en el equilibrio no muestra diferencia notoria, esto evidencia que la temperatura influye en el valor de la humedad de equilibrio y la humedad inicial de las semillas no presenta efecto significativo.

Después de una (a_w) de 0.63 se nota que la curva de 35°C se separa de las demás y a 0.85 se aprecia un entrecruzamiento "cross-over" de las curvas de 15°C y 25°C, es decir se hace evidente que las muestras adsorbieron más agua a 15°C y 25°C que a los 35°C, esto debido probablemente a que las moléculas de agua a bajas temperaturas tienen una menor energía cinética, la cual no es suficiente para superar la correspondiente energía de adsorción. Otros investigadores también observaron "cross-over" como Arana et al., 1987 en isotermas de maíz y trigo.

Modelado de los datos experimentales. En el cuadro 08, se presenta el resumen de los resultados obtenidos para los modelos propuestos, con sus respectivas constantes, además de los valores de coeficiente de determinación R^2 y del porcentaje de error medio %E. A excepción de la ecuación de BET, los demás modelos dieron un buen grado de ajuste con R^2 superior a 0.94 y a diferencia de BET y Henderson los modelos de GAB, Oswin y Peleg tuvieron %E inferior al 10%. Las ecuaciones de GAB, Oswin y Peleg se ajustan mejor a los datos experimentales. En la figura 76 se presenta el grado de ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales de 15°C de temperatura y 4% de humedad de las semillas de *J. curcas*. Arana et al., en isotermas de maíz y trigo, evaluó los modelos matemáticos de GAB, Caurie, Oswin, BET, Henderson y Bradley, reportando como mejores los tres primeros.

Cuadro 8. Resumen de los parámetros de las ecuaciones y ajuste de cada modelo matemático propuesto.

MODELO	PARAMET.	TRATAMIENTOS								
		15°C			25°C			35°C		
		4%	14%	24%	4%	14%	24%	4%	14%	24%
GAB	X_m	0.04834	0.05133	0.05143	0.03689	0.03837	0.0382	0.04382	0.05291	0.05152
	K	0.86077	0.84773	0.84925	0.93581	0.92733	0.93389	0.73557	0.66692	0.67848
	C	88.94889	37.12176	47.72242	23.48331	46.01914	66.16616	14.82479	10.63353	11.02279
	$ChiSquare$	4.35E-04	2.79E-04	4.14E-04	1.19E-04	1.91E-04	1.59E-04	2.73E-05	3.10E-05	1.52E-05
	$COD(R^2)$	0.95041	0.96775	0.95295	0.98795	0.97926	0.98389	0.98414	0.98202	0.99117
	%E	8.88	6.48	8.15	6.24	9.62	8.52	3.56	4.16	3.15
BET	X_m	0.01521	0.01515	0.01527	0.02157	0.02093	0.02207	0.01549	0.01556	0.01543
	C	21.51662	22.21854	23.11818	28.1145	28.39184	35.99033	22.27931	18.15567	14.49919
	$ChiSquare$	0.00378	0.00397	0.00411	8.79E-04	0.00126	0.00109	8.21E-04	0.00103	0.00103
	$COD(R^2)$	0.49637	0.46609	0.4547	0.89599	0.83965	0.87181	0.44445	0.305	0.303
	%E	48.52	49.24	49.22	27.24	32.26	29.95	36.87	38.94	40.19
OSWIN	A	0.09033	0.09141	0.09304	0.06964	0.0748	0.07571	0.06163	0.06445	0.0642
	B	0.37522	0.37018	0.36715	0.542	0.50634	0.51601	0.33827	0.32163	0.32429
	$ChiSquare$	2.12E-04	1.25E-04	2.00E-04	9.99E-05	1.70E-04	1.48E-04	2.16E-05	3.92E-05	2.55E-05
	$COD(R^2)$	0.97174	0.98312	0.97346	0.98818	0.97845	0.9825	0.98535	0.97347	0.98275
	%E	7.05	5.09	5.83	7.63	9.39	10.00	4.49	7.18	6.29
HENDERSON	A	20.8964	21.21937	21.73984	9.78669	11.36145	10.57023	106.14219	126.51379	121.25208
	B	1.42502	1.4368	1.46121	0.97961	1.07248	1.04767	1.83475	1.92937	1.91062
	$ChiSquare$	4.41E-04	2.76E-04	3.97E-04	2.98E-04	4.11E-04	4.26E-04	2.40E-05	2.29E-05	1.03E-05
	$COD(R^2)$	0.94127	0.9628	0.94726	0.96473	0.94788	0.94971	0.98375	0.9845	0.99303
	%E	13.07	10.79	12.64	18.84	19.24	19.84	4.98	3.52	2.80
PELEG	$K1$	0.43724	0.36221	0.38438	0.13617	0.13095	0.13625	0.10604	0.11411	0.11398
	$K2$	0.16996	0.17675	0.17258	0.40256	0.39337	0.44097	0.17125	0.16417	0.14306
	$n1$	24.69755	23.0993	22.7442	0.83557	0.69416	0.71076	0.67347	0.703	0.70807
	$n2$	0.75603	0.81138	0.74679	12.62833	12.22217	13.10677	15.9611	18.45944	17.17432
	$ChiSquare$	1.60E-04	1.33E-04	1.59E-04	8.94E-05	1.20E-04	8.81E-05	1.67E-05	2.24E-05	1.05E-05
	$COD(R^2)$	0.98475	0.98722	0.98492	0.99245	0.98915	0.99256	0.99191	0.98918	0.99492
	%E	8.39	7.67	7.00	7.38	5.62	5.64	3.76	4.43	3.47

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 76 se puede observar gráficamente el grado de ajuste de los modelos matemáticos utilizados en el experimento.

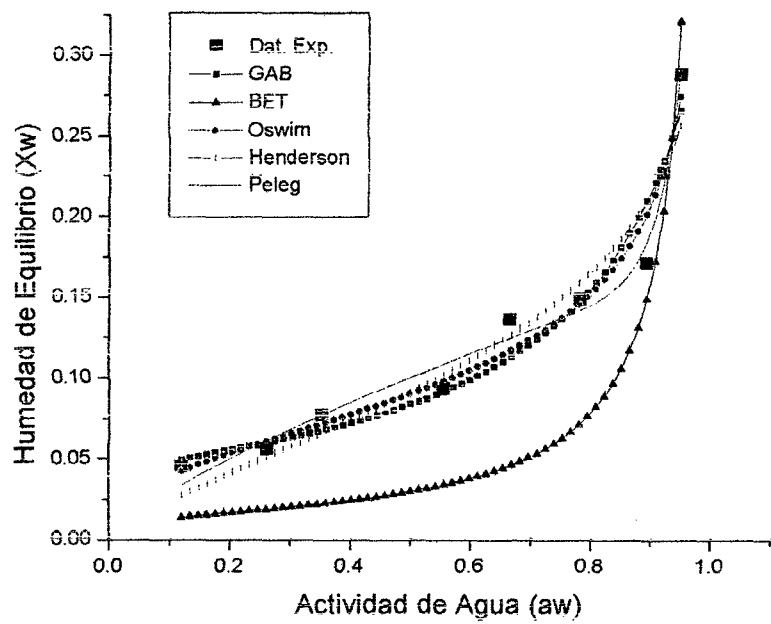


Figura 76: Ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos de GAB, BET, Oswin, Henderson y Peleg.

Determinación de la humedad de monocapa. En la figura 77 se presenta las curvas, ajustadas al modelo de GAB, por permitir estimar este parámetro y tener buen grado de ajuste a los datos experimentales. Los resultados del ANOVA bifactorial, realizados a la humedad de monocapa, con un 95% de confianza, indicó que la influencia de la humedad inicial de las semillas, es no significativa, sin embargo para temperatura mostró que es altamente significativa. Teniendo como base los análisis anteriores, determinamos el valor promedio de la humedad de monocapa para las temperaturas de 15°C, 25°C y 35°C, siendo 5.04%; 3.78% y 4.94% (g. de agua/ 100 g. de sólido seco), respectivamente. La prueba de Tuckey para las temperaturas indica que la diferencia de las medias de 15 y 35°C es estadísticamente no significativa y la de 25°C es significativa. Los valores de humedad de monocapa de 15 y 25°C se encuentran en relación inversa a la temperatura y la de 35°C no sigue la tendencia, Arana et al., observó, en isotermas de maíz y trigo a 10, 25 y 37°C, que el valor de la

monocapa está en relación inversa con la temperatura, para todo el rango, puede deberse a la diferencia en la composición de las semillas, considerando el alto contenido de aceite en las semillas de *J. curcas*.

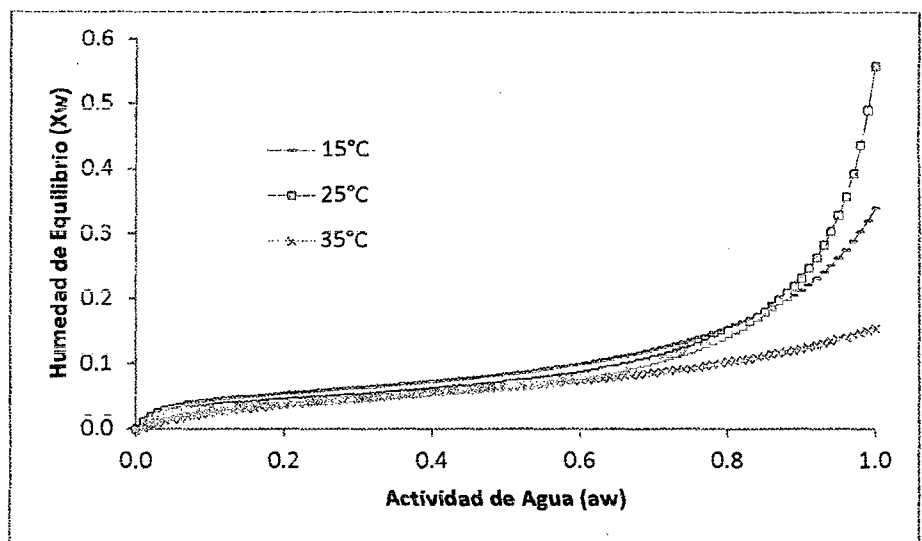


Figura 77: Isoterma de adsorción de semillas de Piñón blanco a 15°C, 25°C y 35°C. Ajustadas con el modelo GAB.

Observando los resultados obtenidos se puede deducir que las condiciones óptimas de almacenamiento de las semillas de Piñón Blanco son: humedad relativa menor a 70%, temperatura menor a 25°C y contenido de humedad menor a 0.1000 Kg agua/Kg m. s., para prevenir reacciones de deterioro del aceite y proteínas.

V. CONCLUSIONES.

- 5.1.** El estudio de la cinética de secado de las semillas y los análisis de control de calidad del aceite, determinan el secado en doble área entre 45°C a 55°C de temperatura, como la mejor condición de secado; en estufa eléctrica de transferencia de calor por convección, se obtiene el aceite de mejor calidad, para ser utilizadas en la producción de biodiesel.
- 5.2.** Los tres modelos de secadores solares en estudio presentaron tiempos similares de 25 horas de sol y la calidad del aceite de Piñón blanco para la producción de biodiesel se encuentra en los rangos permitidos por la norma, siendo el modelo plataforma, el secador solar con mayor conveniencia puesto que conserva mejor el parámetro de índice de peróxido del aceite.
- 5.3.** Las condiciones óptimas de almacenamiento de las semillas de Piñón Blanco fueron: humedad relativa menor de 70%, temperatura menor de 25°C y contenido de humedad menor de 0.1000 Kg agua/Kg m. s., para prevenir reacciones de deterioro del aceite.

VI. RECOMENDACIONES.

- 6.1.** Para secadores artificiales, sea a nivel de laboratorio o industria, usar temperaturas de 45°C a 55°C a doble área.
- 6.2.** Para secadores solares, se recomienda utilizar el modelo de secador solar de plataforma.
- 6.3.** Para el almacenamiento de las semillas de Piñón Blanco, se recomienda humedad de la semilla menor al 10%, temperatura del aire menor a 25°C y humedad relativa del aire inferior a 70%.
- 6.4.** Realizar un estudio de cinética de secado teniendo como factor la velocidad del aire de secado.
- 6.5.** Utilizar la ecuación de Page para predecir el contenido de humedad de las semillas de Piñón blanco durante el secado solar.
- 6.6.** Utilizar las ecuaciones de GAB, Oswin y Peleg para predecir la humedad de equilibrio de la semilla de Piñón blanco en almacenamiento.
- 6.7.** Implementar los laboratorios a nivel de la Región, para obtener mejores resultados en los análisis que se realicen en las investigaciones que se puedan hacer de aquí en adelante.
- 6.8.** Utilizar los resultados de esta investigación como base para trabajos futuros, y mejorar la calidad del aceite, destinado al uso para biodiesel.

VII. REFERENCIAS.

1. **A. O. A. C.** Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, nº 934.06, Arlington, VA, (1990).
2. **AOCS (1997).** AOCS official method Ca 5a-40: free fatty acids. In Official Methods and Recommended Practices of the AOCS (5th ed.). American Oil Chemists' Society Press, Champaign, IL.
3. **Arana, E. e Iturbe, G.** "Determinación de las isothermas de sorción a tres temperaturas en dos variedades de maíz y trigo, su ajuste a modelos matemáticos". Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Departamento de Graduados e investigación en Alimentos. Plan de Ayala y Carpio Col. Sto. Tomás. México, D.F. Universidad Iberoamericana. Ignacio Esteva 26-A.Col. San Miguel Chapultepec 11850 México, D.F.
4. **Araya, J. y Paz, I.** "Efecto de la utilización de biodiesel sobre las emisiones de vehículos pesados" Enero del 2009-Universidad de Chile-Chile.
5. **Bruce, D. M.** "Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C" J. Agric. Eng. Res., 32, 337-347 (1985).
6. **Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E.** Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60, 308-319 (1938).
7. **Castillo, L.** (2006). Transformación de Biodiésel, Laboratorio Energía Renovables - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima - Perú.
8. **Ciria, J.** Propiedades y Características de Combustibles Diesel y Biodiesel, diciembre 2003.
<http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>
9. **Chhinnman M S (1984).** Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. Transactions of the ASAE, 27, 610-615.
10. **Diamante, L. M.; Munro, P. A.** "Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices". Int. J. Food Sci. Technol., 26, 99-109, (1991).
11. **Felix, É. y Rosell, C.** Bioenergía y seguridad alimentaria "BEFS". El análisis de BEFS para el Perú. Compendio técnico. Volumen I.

12. **Geankoplis, C.** 1998, "Proceso de transporte y operaciones unitarias" 3ª edición, paginas 596 al 609 del capítulo 9. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. México.
13. **Gomes, J. Ribeiro, F. Castro, P. y Carlos, A.** "Cinética de secado de frutos de mamona (*Ricinus communis* L.) variedad IAC-80". III Congreso Brasileño de plantas Oleaginosas, Aceite y Biodiesel, julio 2006. Universidad Federal de Lavras.
14. **Guarte R. C. (1996).** Modeling the drying behavior of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, Hohenheim, Stuttgart, Germany.
15. **Guerra J.** "Velocidad de secado de bagazo bajo condiciones constantes de flujo a través". Universidad de la Habana, Serie 6, N°6. 1971
16. **Grobart F.** "Determinación experimental de la humedad crítica del bagazo" Revista ICIDCA. N°1, 1973.
17. **Hidalgo, E. Garay, R.** "Evaluación de alternativas tecnológicas de postcosecha para la conservación de la calidad de los granos de maíz amarillo duro". Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Estación Experimental "El Porvenir", Juan Guerra, Región San Martín.
18. **Hummedia M A; Sheikh A E (1989).** Determination of drying curves of two varieties of peanuts. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 20(4), 47–51, 58.
19. **Kashaninejad M; Mortazavi A; Safekordi A; Tabil L G (2007).** Thinlayer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering, 78(1), 98–108.
20. **Martínez A.** "Modelación matemática de la cinética de secado de bagazo en cama fija con flujo cruzado del agente secante". Tesis para C. Dr. C. T., ISJAE. Fac. de Ing. Mecánica. Stgo. De Cuba.1988.
21. **Martinez N., V. Chiralt, A.** Influence of roasting on water sorption isotherms of Nuts. Food Science and Technology International 2, 399-404. (1996).
22. **Mejia, F. (2006).** Cultivo de *Jatropha curcas* y construcción de una planta de biodiesel en San Esteban, Olancho, Honduras. Disponible en: http://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=odoc_957_1_2_2062006.pdf

23. **Medina V. Mari, Tello P. Betty, Heredia B. Jensen, Mendieta T. Oscar.** "Evaluación de modelos cinéticos para el secado de filetes de *Oreochromis niloticus* (Tilapia) con aire caliente."
24. **Osorio (1977).** Métodos oficiales de análisis de grasas y aceites. CDTA. Madrid — España. Disponible en: http://www.observatorioalimentario.org/metodos_oficiales/aceites/aceites.pdf
25. **Restrepo, A. Burbano J.** "Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos", 2005. Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica de Pereira.
26. **Reyes P.** "Diseños de Experimentos Agrícolas". Editorial Trillas MEXICO, primera edición, junio 1978.
27. **Sirisomboon, P.; Kitchaiya, P.** Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. **Biosystems Engineering**, v. 102, n. 02, p. 244-250, 2009.
28. **Tadao, E. Da Silva, P. y Calil, M.** "Determinación de la cinética de secado de frutos de mamona (*Ricinus communis* L.) de la variedad IAC-80. III Congreso Brasileño de plantas Oleaginosas, Aceite y Biodiesel, julio 2006. Universidad Federal de Lavras.
29. **Tarso, P. Chavez, A.** "Isotermas de desorción de mamona (*Ricinus communis* L.) para efecto de almacenamiento agroindustrial". III Congreso Brasileño de plantas Oleaginosas, Aceite y Biodiesel, julio 2006. Universidad Federal de Lavras.
30. **Torres, C. (2007).** Cultivos energéticos, ficha técnica de la *Jatropha curcas* L en México. Disponible en: http://www.elsitioagricola.com/articulos/cultivosEnergeticos/JatrophaCurcas_FichaTecnica.pdf
31. **Ullmann R. Resende O. De Fátima J. e Honório T.** "Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial". Revista Ciência Agronômica, v. 41, n. 3, p. 442-447, jul-set, 2010 Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
32. **Yagcioglu A; Degirmencioglu A; Cagatay F (1999).** Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In: Proceedings of the Seventh International Congress on Agricultural Mechanization and Energy

(Basxc,etinc,elik A ed), pp. 565–569. Faculty of Agriculture, C, ukurova University, Adana, Turkey, 26–27 May.

33. **Vargas, V. Garay, R. et. 2010** “Determinación de época de cosecha y uso de biorreguladores en el cultivo de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.) en la Región San Martín.” Proyecto de tesis, Universidad Nacional de San Martín. No publicado. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Estación Experimental “El Porvenir”, Juan Guerra, Región San Martín.
34. **Wang C Y; Singh R P (1978)**. A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper no. 3001.
35. **White G M; Ross I J; Ponekert R (1981)**. Fully exposed drying of popcorn. Transactions of the ASAE, 24, 466–468.
36. **Yaldiz O; Ertekin C; Uzun H I (2001)**. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. Energy, 26(5), 457–465.
37. **Zhang Q; Litchfield J B (1991)**. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. Drying Technology, 9, 383–395.

VIII. ANEXOS.

ANEXO 01: Valores de los resultados observados en el experimento “Influencia de la temperatura y del área expuesta al secado en la calidad del aceite y en la cinética de secado de la semilla de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.)”, análisis de varianza y prueba de Tuckey.

Cuadro 9. Humedad base seca de equilibrio (Y_q) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.0078	0.0425	0.0796	0.1723	0.0763
	0.0083	0.0442	0.0867	0.1729	
	0.0069	0.0431	0.0871	0.1729	
	0.0073	0.0423	0.0752	0.1718	
Doble	0.0078	0.0445	0.0960	0.1625	0.0741
	0.0087	0.0382	0.0694	0.1716	
	0.0066	0.0395	0.0825	0.1692	
	0.0082	0.0393	0.0761	0.1661	
Promedio	0.0077	0.0417	0.0816	0.1699	0.0752

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 10. Análisis de varianza de la humedad base seca de equilibrio (Y_q), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Y_q

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.11758612	0.01679802	716.57	< 0.0001
Error	24	0.00056262	0.00002344		
Corrección Total	31	0.11814873			

R2 C. V. Raíz MSE Y_q Medio
0.995238 6.436605 0.004842 0.075222

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.00003763	0.00003763	1.61	0.2173
Temperatura	3	0.11751677	0.03917226	1671.00	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	0.00003172	0.00001057	0.45	0.7189

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. Prueba de Tuckey de la humedad base seca de equilibrio (Y_q) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Yq			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			24
Error Cuadrado Medio			0.000023
Valor crítico para el rango de estudio			2.9188
Diferencia Mínima Significativa			0.0035
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.076306	16	Simple
A	0.074138	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12. Prueba de Tuckey de la humedad base seca de equilibrio (Y_q) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Yq			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			24
Error Cuadrado Medio			0.000023
Valor crítico para el rango de estudio			3.90126
Diferencia Mínima Significativa			0.0067
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.169913	8	35°C
B	0.081575	8	45°C
C	0.0417	8	55°C
D	0.0077	8	65°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 13. Velocidad de secado constante (R_c) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.1662	0.0909	0.0483	0.0200	0.0813
	0.1668	0.0912	0.0479	0.0201	
	0.1669	0.0907	0.0478	0.0195	
	0.1659	0.0908	0.0487	0.0198	
Doble	0.1027	0.0689	0.0277	0.0139	0.0534
	0.1024	0.0686	0.0280	0.0140	
	0.1039	0.0682	0.0273	0.0141	
	0.1038	0.0675	0.0287	0.0144	

Promedio	0.1348	0.0796	0.0381	0.0170	0.0674
----------	--------	--------	--------	--------	--------

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14. Análisis de varianza de la velocidad constante (R_c), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente		Rc			
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.07470144	0.01067163	45940.7	< 0.0001
Error	24	0.00000558	0.00000023		
Corrección Total	31	0.07470701			
R2	C. V.	Raíz MSE	Rc Medio		
0.999925	0.715482	0.000482	0.067362		
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.00625521	0.00625521	26928.30	< 0.0001
Temperatura	3	0.06479254	0.02159751	92975.80	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	0.00365368	0.00121789	5242.95	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 15. Prueba de Tuckey de la velocidad de secado constante (R_c) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA	
Proceso del ANOVA	
Prueba Tukey para Rc	
Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	2.32E-07
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.0004
Promedios con la misma letra es no significativo	
Grupo Tukey	Promedio
A	0.0813438
B	0.0533813
N	Área de Secado
16	Simple
16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16. Prueba de Tuckey de la velocidad de secado constante (R_c) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para R_c

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	2.32E-07
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.0007

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.134825	8	65°C
B	0.0796	8	55°C
C	0.03805	8	45°C
D	0.016975	8	35°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 17. Humedad base seca libre crítica (X_c) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.2517	0.2521	0.2553	0.2482	0.2517
	0.2482	0.2501	0.2494	0.2521	
	0.2544	0.2486	0.2459	0.2525	
	0.2521	0.2603	0.2562	0.2496	
Doble	0.2520	0.2523	0.2621	0.2516	0.2536
	0.2546	0.2476	0.2617	0.2564	
	0.2492	0.2501	0.2588	0.2557	
	0.2492	0.2564	0.2500	0.2505	
Promedio	0.2514	0.2522	0.2549	0.2521	0.2527

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18. Análisis de varianza de la humedad base seca libre crítica (X_c), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: X_c

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.00016138	0.00002305	1.50	0.2148
Error	24	0.00036896	0.00001537		
Corrección Total	31	0.00053034			

R2 0.3043 C. V. 1.551879 Raíz MSE 0.003921 X_c Medio 0.252653

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.00003101	0.00003101	2.02	0.1684
Temperatura	3	0.00005777	0.00001926	1.25	0.3129
Área de Secado*Temperatura	3	0.00007261	0.0000242	1.57	0.2215

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 19. Prueba de Tuckey de la humedad base seca libre crítica (X_c) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para X_c

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	1.50E-05
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.0028

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.253638	16	Doble
A	0.251669	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20. Prueba de Tuckey de la humedad base seca libre crítica (X_c) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para X_c

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.000015
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.0054

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.254925	8	45°C
A	0.252188	8	55°C
A	0.252075	8	35°C
A	0.251425	8	65°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 21. Humedad base seca libre crítica (X_D) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.0406	0.0407	0.0406	0.0408	0.0407
	0.0414	0.0404	0.0420	0.0397	
	0.0404	0.0407	0.0419	0.0391	
	0.0407	0.0407	0.0402	0.0408	
Doble	0.0407	0.0396	0.0419	0.0406	0.0410
	0.0400	0.0401	0.0403	0.0411	
	0.0419	0.0403	0.0407	0.0396	
	0.0443	0.0394	0.0438	0.0411	
Promedio	0.0412	0.0402	0.0414	0.0403	0.0408

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22. Análisis de varianza de la humedad base seca libre crítica (X_D), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente:		X_D			
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.00001289	0.00000184	1.74	0.1467
Error	24	0.00002539	0.00000106		
Corrección Total	31	0.00003828			
R2		C. V.	Raíz MSE	X_D Medio	
0.336833		2.519869	0.001029	0.040816	
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	6.90E-07	6.90E-07	0.65	0.4271
Temperatura	3	8.89E-06	2.96E-06	2.80	0.0616
Área de Secado*Temperatura	3	3.32E-06	1.11E-06	1.04	0.3907

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23. Prueba de Tuckey de la humedad base seca libre crítica (X_D) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para X_D			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			24
Error Cuadrado Medio			1.06E-06
Valor crítico para el rango de estudio			2.9188
Diferencia Mínima Significativa			0.0008
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.0409625	16	Doble
A	0.0406687	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 24. Prueba de Tuckey de la humedad base seca libre crítica (X_D) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para X_0

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	1.058E-06
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.0014

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.041425	8	45°C
A	0.04125	8	65°C
A	0.04035	8	35°C
A	0.0402375	8	55°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 25. Tiempo total de secado (t_T), horas, en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	27.39	51.93	93.28	213.05	96.71
	26.17	50.57	90.96	212.64	
	27.28	51.65	91.30	223.75	
	26.97	51.76	91.92	216.73	
Doble	22.77	35.10	80.95	150.10	72.58
	23.30	35.95	85.84	152.80	
	22.38	36.04	86.12	151.53	
	20.65	36.32	79.49	141.92	
Promedio	24.61	43.66	87.48	182.81	84.64

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 26. Análisis de varianza del tiempo total de secado (t_T), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente:		Tt			
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	129214.137	18459.1625	2262.51	< 0.0001
Error	24	195.809	8.1587		
Corrección Total	31	129409.946			
R2		C. V.	Raíz MSE	Tt Medio	
0.998487		3.374537	2.856345	84.64406	
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	4658.2965	4658.2965	570.96	< 0.0001
Temperatura	3	119428.093	39809.3645	4879.37	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	5127.7473	1709.2491	209.50	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 27. Prueba de Tuckey del tiempo total de secado (t_T) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Tt			
Alpha	0.05		
Error Grados de Libertad	24		
Error Cuadrado Medio	8.158707		
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188		
Diferencia Mínima Significativa	2.0843		
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	96.709	16	Simple
B	72.579	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 28. Prueba de Tuckey del tiempo total de secado (t_T) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Tt			
Alpha	0.05		
Error Grados de Libertad	24		
Error Cuadrado Medio	8.158707		
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126		
Diferencia Mínima Significativa	3.9398		
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	182.815	8	35°C
B	87.483	8	45°C
C	43.665	8	55°C
D	24.614	8	65°C

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 02: Valores de los resultados observados en el experimento “Influencia de la temperatura y del área expuesta al secado en la calidad del aceite de Piñón blanco (*Jatropha curcas* L.)”, análisis de varianza y prueba de Tuckey.

Cuadro 29. Índice de acidez del aceite en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.9294	0.3591	0.3569	0.8667	0.6205
	0.9788	0.3540	0.3619	0.8891	
	0.8993	0.3387	0.3487	0.8008	
	0.9175	0.3367	0.3449	0.8461	
Doble	0.8906	0.4305	0.3864	0.6789	0.6199
	0.9370	0.3797	0.3978	0.7549	
	0.9464	0.4259	0.3819	0.7613	
	0.9313	0.5022	0.3815	0.7324	
Promedio	0.9288	0.3908	0.3700	0.7913	0.6202

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30. Análisis de varianza del índice de acidez del aceite, en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Acidez

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	1.96341016	0.28048717	304.12	< 0.0001
Error	24	0.02213491	0.00092229		
Corrección Total	31	1.98554506			

R2 0.988852 C. V. 4.896455 Raíz MSE 0.030369 Acidez Medio 0.620228

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.00000306	0.00000306	0.00	0.9545
Temperatura	3	1.91755488	0.63918496	693.04	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	0.04585221	0.01528407	16.57	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31. Prueba de Tuckey del índice de acidez en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Acidez

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.000922
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.0222

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.62054	16	Simple
A	0.61992	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 32. Prueba de Tuckey del índice de acidez en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Índice de Acidez			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			24
Error Cuadrado Medio			0.000922
Valor crítico para el rango de estudio			3.90126
Diferencia Mínima Significativa			0.0419
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.92879	8	65°C
B	0.79128	8	35°C
C	0.39085	8	55°C
C	0.37	8	45°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33. Índice de peróxido del aceite en función de la temperatura y del área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.8730	0.2634	0.1924	0.2455	0.3561
	0.6786	0.2668	0.1753	0.2376	
	0.6880	0.1881	0.1876	0.2353	
	0.8383	0.1932	0.1965	0.2372	
Doble	0.5619	0.2679	0.1992	0.1590	0.3102
	0.6032	0.2745	0.1667	0.1796	
	0.5520	0.3492	0.2004	0.1587	
	0.5922	0.3367	0.1948	0.1673	
Promedio	0.6734	0.2675	0.1891	0.2025	0.3331

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 34. Análisis de varianza del índice de peróxidos del aceite, en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Peróxido

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	1.36011813	0.19430402	105.29	< 0.0001
Error	24	0.0442918	0.00184549		
Corrección Total	31	1.40441992			

R2 0.968463 C. V. 12.89569 Raíz MSE 0.042959 Peroxido Medio 0.333128

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.0168132	0.0168132	9.11	0.0059
Temperatura	3	1.26314367	0.42104789	228.15	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	0.08017127	0.02672373	14.48	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 35. Prueba de Tuckey del índice de peróxidos del aceite en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Peróxido

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.001845
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.0313

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.35605	16	Simple
B	0.31021	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 36. Prueba de Tuckey del índice de peróxidos del aceite en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Índice de Peróxido			
Alpha	0.05		
Error Grados de Libertad	24		
Error Cuadrado Medio	0.001845		
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126		
Diferencia Mínima Significativa	0.0593		
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.6734	8	65°C
B	0.26748	8	55°C
C	0.20253	8	35°C
C	0.18911	8	45°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 37. Índice de yodo del aceite (mg I/100 aceite) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	97.43	108.06	102.58	97.02	100.44
	99.88	100.21	101.33	99.95	
	101.14	94.81	100.89	100.34	
	101.11	102.37	99.62	100.25	
Doble	101.52	97.42	99.41	96.73	100.99
	106.60	100.62	99.99	98.90	
	100.67	103.20	102.15	101.70	
	98.65	108.38	101.31	98.56	
Promedio	100.87	101.88	100.91	99.18	100.71

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 38. Análisis de varianza del índice de yodo del aceite (mg I/100 aceite), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Yodo

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	40.84395	5.83485	0.62	0.7372
Error	24	227.24585	9.4685771		
Corrección Total	31	268.0898			

R2 0.152352 C. V. 3.055336 Raíz MSE 3.077105 Yodo Medio 100.7125

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	2.4310125	2.4310125	0.26	0.617
Temperatura	3	30.255725	10.0852417	1.07	0.3824
Área de Secado*Temperatura	3	8.1572125	2.71907083	0.29	0.8342

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 39. Prueba de Tuckey del índice de yodo del aceite (mg I/100 aceite) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Yodo

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	9.468577
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	2.2454

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	100.988	16	Doble
A	100.437	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 40. Prueba de Tuckey del índice de yodo del aceite (mg I/100 aceite) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Índice de Yodo

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	9.468577
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	4.2443

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	101.884	8	55°C
A	100.91	8	45°C
A	100.875	8	65°C
A	99.181	8	35°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 41. Índice de saponificación del aceite (mg KOH/Kg aceite) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	184.63	190.91	185.76	179.98	186.57
	187.08	184.83	189.33	181.40	
	186.31	193.07	188.86	185.60	
	185.39	189.96	186.69	185.33	
Doble	191.53	185.15	188.09	187.00	187.40
	191.37	185.30	188.39	184.51	
	189.73	183.73	187.63	186.85	
	190.76	185.29	187.31	185.76	
Promedio	188.35	187.28	187.76	184.55	186.98

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 42. Análisis de varianza del índice de saponificación del aceite (mg KOH/Kg aceite), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Saponificación

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	181.6357	25.9479	7.68	< 0.0001
Error	24	81.07507	3.378128		
Corrección Total	31	262.7107			

R2 C. V. Raíz MSE Saponificación Medio
0.69139 0.982948 1.837968 186.9853

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	5.5029031	5.5029031	1.63	0.2141
Temperatura	3	67.6638594	22.5546198	6.68	0.002
Área de Secado*Temperatura	3	108.468959	36.1563198	10.70	0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 43. Prueba de Tuckey del índice de saponificación del aceite (mg KOH/Kg aceite) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Saponificación

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	3.378128
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	1.3412

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	187.4	16	Doble
A	186.57	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 44. Prueba de Tuckey del índice de saponificación del aceite (mg KOH/Kg aceite) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA

Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Saponificación

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	3.378128
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	2.5351

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	188.35	8	65°C
A	187.7575	8	45°C
A	187.28	8	55°C
B	184.5538	8	35°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 45. Contenido de grasa total de la almendra (%) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	49.98	49.83	49.99	48.69	49.09
	48.94	48.75	48.92	48.95	
	48.54	48.35	48.55	48.52	
	49.34	49.36	49.32	49.36	
Doble	49.35	49.67	49.36	49.33	48.94
	47.95	48.57	47.93	48.59	
	48.32	48.31	48.34	48.38	
	49.65	49.95	49.64	49.68	
Promedio	49.01	49.10	49.01	48.94	49.01

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 46. Análisis de varianza del contenido de grasa total de la almendra (%), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Contenido de Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.71452188	0.10207455	0.22	0.9761
Error	24	10.990725	0.45794687		
Corrección Total	31	11.7052469			

R2 C. V. Raíz MSE C. Aceite Medio
0.061043 1.380696 0.676718 49.01281

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.17552813	0.17552813	0.38	0.5417
Temperatura	3	0.10493438	0.03497813	0.08	0.9721
Área de Secado*Temperatura	3	0.43405937	0.14468646	0.32	0.8137

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 47. Prueba de Tuckey del contenido de grasa total de la almendra (%) en función del área de sacado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Contenido de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.457947
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.4938

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	49.0869	16	Simple
A	48.9388	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 48. Prueba de Tuckey del contenido de grasa total de la almendra (%) en función de la temperatura de sacado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Contenido de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.457947
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.9334

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área
A	49.0988	8	55°C
A	49.0088	8	65°C
A	49.0063	8	45°C
A	48.9375	8	35°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 49. Densidad del aceite a 15°C (g/cm³) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.922062	0.919258	0.919666	0.920137	0.919997
	0.918888	0.919971	0.919874	0.920485	
	0.920353	0.921927	0.918793	0.918816	
	0.918935	0.921129	0.920338	0.919312	
Doble	0.921993	0.919232	0.920663	0.920509	0.919524
	0.918745	0.919364	0.918238	0.918901	
	0.920103	0.919884	0.917780	0.919427	
	0.918682	0.920614	0.919283	0.918968	
Promedio	0.919970	0.920172	0.919329	0.919569	0.919760

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 50. Análisis de varianza de la densidad del aceite a 15°C (cm³/g), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente:		Densidad			
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.00000585	0.00000084	0.69	0.6772
Error	24	0.00002895	0.00000121		
Corrección Total	31	0.0000348			
R2		C. V.	Raíz MSE	Densidad Medio	
0.168154		0.119411	0.001098	0.91976	
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	1.79E-06	1.78E-06	1.48	0.2356
Temperatura	3	3.48E-06	1.16E-06	0.96	0.4259
Área de Secado*Temperatura	3	5.79E-07	1.93E-07	0.16	0.9221

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 51. Prueba de Tuckey de la densidad del aceite a 15°C (cm³/g) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Densidad de Aceite			
Alpha	0.05		
Error Grados de Libertad	24		
Error Cuadrado Medio	1.20E-06		
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188		
Diferencia Mínima Significativa	0.0008		
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.9199965	16	Simple
A	0.9195241	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 52. Prueba de Tuckey de la densidad del aceite a 15°C (cm³/g) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Densidad de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	1.20E-06
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.0015

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.9201724	8	55°C
A	0.9199701	8	65°C
A	0.9195694	8	35°C
A	0.9193294	8	45°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 53. Viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	34.99	35.41	33.50	34.73	35.04
	35.52	33.65	33.77	35.24	
	35.46	35.43	36.14	37.43	
	35.54	35.07	35.19	33.61	
Doble	35.77	34.65	35.09	35.84	35.31
	35.77	33.56	34.94	35.03	
	35.62	35.71	35.87	35.89	
	35.45	34.83	35.26	35.75	
Promedio	35.52	34.79	34.97	35.44	35.18

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 54. Análisis de varianza de la viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA

Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Viscosidad Cinemática del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	4.34964688	0.62137813	0.83	0.5756
Error	24	18.050775	0.75211562		
Corrección Total	31	22.4004219			

R2	C. V.	Raíz MSE	Viscosidad Medio
0.194177	2.465277	0.867246	35.17844

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.59132812	0.59132812	0.79	0.384
Temperatura	3	3.01593438	1.00531146	1.34	0.2859
Área de Secado*Temperatura	3	0.74238438	0.24746146	0.33	0.8044

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 55. Prueba de Tuckey de la viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA

Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Viscosidad de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.752116
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.6328

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	35.3144	16	Doble
A	35.0425	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 56. Prueba de Tuckey de la viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Viscosidad de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	0.752116
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	1.1962

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	35.515	8	65°C
A	35.44	8	35°C
A	34.97	8	45°C
A	34.7888	8	55°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 57. Humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/Kg aceite) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	608.64	412.57	411.10	631.54	513.61
	596.24	369.76	493.23	612.33	
	592.79	398.27	419.62	670.97	
	617.96	435.07	373.08	574.55	
Doble	667.18	513.34	476.36	399.80	515.62
	675.37	549.25	440.30	430.68	
	650.90	512.53	436.33	416.69	
	717.30	530.50	438.04	395.28	
Promedio	640.80	465.16	436.01	516.48	514.61

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 58. Análisis de varianza de la humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/Kg aceite), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: **Húmedad del Aceite**

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	328063.78	46866.25	55.56	< 0.0001
Error	24	20245.54	843.56		
Corrección Total	31	348309.33			

R2 C. V. Raíz MSE Húmedad Medio
0.941875 5.643903 29.04418 514.6116

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	32.2605	32.2605	0.04	0.8466
Temperatura	3	196402.511	65467.5038	77.61	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	131629.012	43876.3373	52.01	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 59. Prueba de Tuckey de la humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/ Kg aceite) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Húmedad de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	843.5643
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	21.194

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	515.62	16	Doble
A	513.61	16	Simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 60. Prueba de Tuckey de la humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/Kg aceite) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Húmedad de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	843.5643
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	40.061

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	640.8	8	65°C
B	516.48	8	35°C
C	465.16	8	55°C
C	436.01	8	45°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 61. Contenido de cenizas totales del aceite (%) en función de la temperatura y área de secado.

Área de Secado	Temperatura				Promedio
	65°C	55°C	45°C	35°C	
Simple	0.013963	0.006981	0.002994	0.002996	0.006788
	0.012951	0.006961	0.002993	0.002989	
	0.013921	0.005983	0.003977	0.002983	
	0.014966	0.006977	0.003986	0.002989	
Doble	0.014961	0.005979	0.002982	0.001988	0.006476
	0.013948	0.006979	0.003993	0.002995	
	0.011932	0.005938	0.004994	0.002996	
	0.011973	0.005986	0.001992	0.003983	
Promedio	0.013577	0.006473	0.003489	0.002990	0.006632

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 62. Análisis de varianza del contenido de cenizas totales del aceite (%), en función de la temperatura y área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA

Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Contenido de Cenizas del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	7	0.00057283	0.00008183	107.37	< 0.0001
Error	24	0.00001829	0.00000076		
Corrección Total	31	0.00059112			

R2	C. V.	Raíz MSE	Cenizas Medio
0.969055	13.16361	0.000873	0.006632

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Área de Secado	1	0.00000078	0.00000078	1.02	0.3223
Temperatura	3	0.00057121	0.0001904	249.81	< 0.0001
Área de Secado*Temperatura	3	0.00000085	0.00000028	0.37	0.7751

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 63. Prueba de Tuckey del contenido de cenizas totales del aceite (%) en función del área de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA

Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Contenido de Cenizas de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	7.62E-07
Valor crítico para el rango de estudio	2.9188
Diferencia Mínima Significativa	0.0006

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Área de Secado
A	0.0067881	16	Simple
A	0.0064762	16	Doble

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 64. Prueba de Tuckey del contenido de cenizas totales del aceite (%) en función de la temperatura de secado.

Experimento Bifactorial 2*4 con Arreglo Combinatorio y DCA
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Contenido de Cenizas de Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	24
Error Cuadrado Medio	7.62E-07
Valor crítico para el rango de estudio	3.90126
Diferencia Mínima Significativa	0.0012

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Temperatura
A	0.0135769	8	65°C
B	0.006473	8	55°C
C	0.0034889	8	45°C
C	0.0029899	8	35°C

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 03: Valores de los resultados observados en el experimento “Influencia del Modelo de secador solar en la calidad del aceite de Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.)”, análisis de varianza y prueba de Tuckey.

Cuadro 65. Temperatura y humedad relativa del aire, y humedad de las semillas para los tres Modelos de secadores solares en función del tiempo de secado, observados entre los días 27-28-29 de noviembre de 2010, correspondientes al secado de las semillas de la primera cosecha.

Fecha	hora	Plataforma			Parihuela			Tradicional		
		T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh
27/11/2010	09:40	39.5	39.7	34.6	35.3	49.7	34.6	32.5	51.4	34.6
	10:40	39.0	36.5	30.4	37.3	45.4	27.1	33.8	50.7	27.2
	12:00	37.2	37.0	23.6	34.2	44.1	21.9	32.7	45.2	23.4
	13:00	42.2	29.5	21.5	35.3	40.4	19.2	32.2	51.8	20.7
	14:00	36.1	39.9	18.7	34.6	48.4	17.1	33.3	46.3	18.2
	15:00	36.8	41.8	15.8	36.4	42.0	14.2	33.6	43.6	15.7
	16:00	35.3	39.4	14.5	33.1	49.0	13.6	32.6	47.8	13.4
	17:00	31.2	52.5	15.2	31.2	53.1	12.6	31.3	52.3	13.5
28/11/2010	07:30	32.7	53.6	12.3	32.5	64.2	11.6	27.0	70.3	10.1
	09:30	37.5	39.3	9.1	36.3	44.5	8.9	32.7	51.0	7.7
	11:30	36.1	45.9	6.2	37.5	46.8	6.4	32.7	55.0	6.9
	13:30	40.3	29.4	4.6	42.5	33.1	4.1	34.1	42.8	5.8
	15:30	39.2	35.7	3.2	38.3	37.0	3.8	35.5	43.5	4.0
	17:30	32.3	49.5	4.0	32.9	48.5	4.3	32.7	49.4	4.1
29/11/2010	07:00	31.4	67.5	5.8	27.2	81.4	7.3	25.1	80.5	4.5
	09:00	56.2	24.5	4.2	37.7	43.7	6.1	36.4	49.6	3.9
	12:00	45.7	25.4	2.6	39.6	35.3	3.6	32.7	50.7	3.4

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 66. Temperatura y humedad relativa del aire, y humedad de las semillas para los tres Modelos de secadores solares en función del tiempo de secado, observados entre los días 22-23-24 de diciembre de 2010, correspondientes al secado de las semillas de la segunda cosecha.

Fecha	hora	Plataforma			Parihuela			Tradicional		
		T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh
22/12/2010	17:30	29.9	60.0	46.2	30.3	55.0	46.2	29.7	52.0	46.2
23/12/2010	07:00	25.2	74.2	37.6	25.3	80.2	39.2	25.1	79.6	33.6
	08:00	29.3	60.6	37.0	27.5	70.5	35.2	25.7	77.4	29.8
	09:00	34.1	55.0	33.4	32.6	64.6	36.4	26.0	76.0	29.1
	10:00	38.0	36.1	30.2	33.8	44.0	28.7	32.7	50.2	23.3
	11:00	35.2	39.6	31.8	32.1	54.5	26.9	30.6	53.7	21.9
	12:00	39.6	41.0	26.3	36.0	51.8	23.7	30.3	56.6	21.8
	13:00	41.2	37.2	19.3	36.3	49.7	21.0	30.8	50.6	16.6
	14:00	39.9	38.8	15.9	36.6	48.5	15.6	31.8	48.7	13.3
	15:00	37.3	39.1	13.3	35.2	47.3	13.2	32.5	47.6	14.0
	16:00	35.4	39.7	14.0	34.4	45.0	10.6	32.0	50.4	13.5
	17:00	32.5	52.0	16.2	32.9	51.8	12.7	30.6	56.0	10.5
24/12/2010	08:00	27.2	71.1	13.8	25.8	85.1	12.1	25.4	74.7	10.3
	10:00	48.2	27.2	8.9	37.3	47.8	8.0	29.8	56.3	6.7
	12:00	47.0	23.8	6.6	37.7	40.0	5.5	31.9	52.2	5.1
	13:00	34.0	40.8	6.4	34.0	45.0	6.2	39.6	36.5	5.3

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 67. Temperatura y humedad relativa del aire, y humedad de las semillas para los tres Modelos de secadores solares en función del tiempo de secado, observados entre los días 29-30-31 de diciembre de 2010, correspondientes al secado de las semillas de la tercera cosecha.

Fecha	hora	Plataforma			Parihuela			Tradicional		
		T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh	T	HR	%Hbh
29/12/2010	15:00	37.0	50.1	41.2	35.0	55.0	41.2	34.0	42.0	41.2
	16:00	33.0	54.2	39.8	33.8	60.0	40.2	33.3	44.8	39.6
	17:00	30.0	56.7	36.8	30.1	58.6	38.8	31.3	51.0	36.9
30/12/2010	07:30	26.8	78.3	33.9	24.4	85.5	31.8	24.5	77.8	33.1
	09:00	37.4	37.7	29.5	32.8	68.5	30.6	29.8	62.0	27.1
	12:00	36.1	40.4	24.1	34.1	44.5	17.9	32.2	49.2	18.0
	17:00	30.7	53.9	14.2	30.5	54.5	10.0	30.3	54.3	10.1
31/12/2010	09:30	43.3	39.5	11.9	38.3	45.5	8.3	35.8	45.6	9.1
	10:30	42.8	35.0	9.5	38.4	36.6	7.5	36.1	43.6	8.0
	11:30	46.0	24.5	6.2	37.1	38.5	6.6	35.5	41.5	6.9
	17:30	31.1	51.4	3.9	31.0	51.4	4.5	31.0	53.4	4.5

Fuente: Elaboración propia.

Calidad de la semilla:

Cuadro 68. Medidas biométricas de las Semillas secadas en el secador solar de Plataforma.

Cosecha		I	II	III	Promedio
Semilla	Peso (g)	0.8764	0.6951	0.5916	0.7210
	Long. (mm)	19.72	18.12	16.69	18.18
	Ancho (mm)	12.08	11.43	11.14	11.55
	Espes. (mm)	9.25	8.58	8.11	8.65
Almendra	Peso (g)	0.5752	0.4449	0.3762	0.4654
	Long. (mm)	16.16	14.41	13.58	14.72
	Ancho (mm)	10.24	9.47	9.32	9.67
	Espes. (mm)	7.75	7.16	6.69	7.20
Testa	Peso (g)	0.3012	0.2502	0.2154	0.2556

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 69. Medidas biométricas de las Semillas secadas en el secador solar de Parihueia.

Cosecha		I	II	III	Promedio
Semilla	Peso (g)	0.9046	0.6611	0.6097	0.7251
	Long. (mm)	19.80	17.93	16.85	18.19
	Ancho (mm)	12.08	11.28	10.85	11.40
	Espes. (mm)	9.36	8.57	8.11	8.68
Almendra	Peso (g)	0.5948	0.4210	0.3982	0.4713
	Long. (mm)	16.14	14.36	14.03	14.84
	Ancho (mm)	10.22	9.19	9.45	9.62
	Espes. (mm)	7.88	7.10	6.88	7.29
Testa	Peso (g)	0.3099	0.2401	0.2115	0.2538

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 70. Medidas biométricas de las Semillas secadas en el secador solar de Tradicional.

Cosecha		I	II	III	Promedio
Semilla	Peso (g)	0.8805	0.7134	0.6169	0.7369
	Long. (mm)	19.42	18.27	16.84	18.18
	Ancho (mm)	11.96	11.47	11.41	11.61
	Espes. (mm)	9.28	8.64	8.18	8.70
Almendra	Peso (g)	0.5801	0.4599	0.3885	0.4761
	Long. (mm)	16.28	15.05	13.90	15.08
	Ancho (mm)	10.18	9.41	8.66	9.42
	Espes. (mm)	7.75	7.32	6.91	7.33
Testa	Peso (g)	0.3004	0.2536	0.2284	0.2608

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 71. Contenido de grasa total de la almendra (%) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	52.92	51.72	50.99	52.06
	53.38	53.15	51.21	
	51.44	52.64	51.13	
II	46.91	42.83	45.51	45.23
	45.96	41.51	45.28	
	45.12	45.22	48.72	
III	51.55	48.68	49.40	50.33
	53.63	48.06	48.40	
	49.50	51.39	52.33	
Promedio	50.05	48.35	49.22	49.21

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 72. Análisis de varianza del contenido de grasa total de la almendra (%), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones

Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Contenido de Grasa de la Almendra

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	240.050556	60.0126	21.91	< 0.0001
Error	22	60.2670444	2.7394		
Corrección Total	26	300.3176			

R2	C. V.	Raíz MSE	Grasa Medio
0.799322	3.363602	1.655117	49.20667

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	227.196089	113.598044	41.47	< 0.0001
Secador	2	12.8544667	6.4272333	2.35	0.1192

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 73. Prueba de Tuckey del contenido de grasa total de la almendra (%) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Contenido de Grasa de la Almendra			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			22
Error Cuadrado Medio			2.739411
Valor crítico para el rango de estudio			3.55259
Diferencia Mínima Significativa			1.96
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	50.0456	9	Plataforma
A	49.2189	9	Tradicional
A	48.3556	9	Parihuela

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 74. Índice de acidez del aceite (mg KOH/g aceite) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	1.2784	0.9307	0.8745	1.0586
	1.1818	1.0544	1.0049	
	1.2406	0.9637	0.9990	
II	0.7574	0.7869	0.8529	0.8012
	0.7044	0.8400	0.9288	
	0.6930	0.7537	0.8934	
III	0.9161	0.8473	0.7569	0.8029
	0.8139	0.8142	0.7219	
	0.8603	0.8108	0.6847	
Promedio	0.938	0.867	0.857	0.8876

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 75. Análisis de varianza del índice de acidez del aceite (mg KOH/g aceite), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Acidez

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	0.43049097	0.10762274	10.64	< 0.0001
Error	22	0.2224688	0.01011222		
Corrección Total	26	0.65295977			

R2 C. V. Raíz MSE Acidez Medio
0.659292 11.32966 0.10056 0.887578

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	0.39517753	0.19758876	19.54	< 0.0001
Secador	2	0.03531344	0.01765672	1.75	0.1978

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 76. Prueba de Tuckey del índice de acidez del aceite (mg KOH/g aceite) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Índice de Acidez

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	0.010112
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	0.1191

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	0.93843	9	Plataforma
A	0.86686	9	Parihuela
A	0.85744	9	Tradicional

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 77. Índice de peróxido del aceite (mg O₂/Kg aceite) en función de los Modelos de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	0.6944	0.6997	0.9310	0.8282
	0.7902	0.8966	0.8552	
	0.7997	0.8930	0.8936	
II	0.6045	0.9878	0.9411	0.8564
	0.5917	0.9130	1.0171	
	0.5835	1.0693	0.9993	
III	0.2248	0.7831	0.6982	0.5819
	0.2271	0.8823	0.6667	
	0.2837	0.7862	0.6852	
Promedio	0.533	0.879	0.854	0.7555

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 78. Análisis de varianza del índice de peróxido del aceite (mg O₂/Kg aceite), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Peróxido

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	1.07950593	0.26987648	22.38	< 0.0001
Error	22	0.26523943	0.01205634		
Corrección Total	26	1.34474536			

R2 C. V. Raíz MSE Peróxido Medio
0.802759 14.53396 0.109801 0.887578

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	0.41023942	0.20511971	17.01	< 0.0001
Secador	2	0.66926651	0.33463325	27.76	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 79. Prueba de Tuckey del índice de peróxido del aceite (mg O₂/Kg aceite) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Índice de Peróxido

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	0.012056
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	0.13

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	0.879	9	Parihuela
A	0.85416	9	Tradicional
B	0.53329	9	Plataforma

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 80. Índice de yodo del aceite (gI/100 g aceite) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	93.01	95.14	85.78	92.05
	98.90	90.62	89.12	
	96.75	88.60	90.51	
II	101.52	90.42	96.81	96.88
	100.67	93.83	97.55	
	102.37	89.16	99.64	
III	97.02	93.44	93.64	93.99
	94.43	92.33	95.18	
	95.39	90.52	93.99	
Promedio	97.78	91.56	93.58	94.31

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 81. Análisis de varianza del Índice de yodo del aceite (g Yodo/100 g aceite) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente: Índice de Yodo					
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	288.057178	72.0142944	9.05	0.0002
Error	22	175.013889	7.9551768		
Corrección Total	26	463.071067			
R2	C. V.	Raíz MSE	Yodo Medio		
0.622058	2.990696	2.820492	94.30889		
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	106.662689	53.3313444	6.70	0.0053
Secador	2	181.394489	90.6972444	11.40	0.0004

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 82. Prueba de Tuckey del índice de yodo del aceite (g Yodo/100 g aceite) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Índice de Yodo			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			22
Error Cuadrado Medio			7.955177
Valor crítico para el rango de estudio			3.55259
Diferencia Mínima Significativa			3.34
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	97.784	9	Plataforma
B	93.58	9	Tradicional
B	91.562	9	Parihuela

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 83. Índice de saponificación del aceite (mg KOH/g aceite) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	194.79	189.70	190.73	191.78
	198.61	189.20	189.70	
	199.59	185.67	188.01	
II	187.35	197.84	189.41	191.05
	187.41	198.60	189.31	
	186.43	195.23	187.90	
III	187.35	197.84	189.41	191.05
	187.41	198.60	189.31	
	186.43	195.23	187.90	
Promedio	190.60	194.21	189.07	191.29

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 84. Análisis de varianza del índice de saponificación del aceite (mg KOH/g aceite), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Índice de Saponificación

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	128.463015	32.1157537	1.65	0.1976
Error	22	428.352859	19.4705845		
Corrección Total	26	556.815874			
R2	C. V.	Raíz MSE	Saponificación Medio		
0.23071	2.306674	4.412549	191.2948		
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	3.1489	1.574459	0.08	0.9226
Secador	2	125.31409	62.65705	3.22	0.0594

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 85. Prueba de Tuckey del índice de saponificación del aceite (mg KOH/g aceite) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Índice de Saponificación			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			22
Error Cuadrado Medio			19.47058
Valor crítico para el rango de estudio			3.55259
Diferencia Mínima Significativa			5.2253
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	194.212	9	Parihuela
A	190.597	9	Plataforma
A	189.076	9	Tradicional

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 86. Densidad del aceite a 15°C (g/cm³) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	0.910325	0.914995	0.913826	0.912044
	0.909071	0.911210	0.913859	
	0.911939	0.911130	0.912041	
II	0.915010	0.910182	0.909668	0.912823
	0.915255	0.912088	0.913210	
	0.914108	0.911153	0.914733	
III	0.914745	0.918312	0.919185	0.917193
	0.919502	0.920184	0.918776	
	0.915132	0.912166	0.916738	
Promedio	0.913899	0.913491	0.914670	0.914020

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 87. Análisis de varianza de la densidad del aceite a 15°C (g/cm³), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Densidad del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	0.00014513	0.00003628	6.87	0.001
Error	22	0.00011618	0.00000528		
Corrección Total	26	0.00026131			

R2 C. V. Raíz MSE Densidad Medio
0.55539 0.251419 0.002298 0.91402

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	0.00013867	0.00006933	13.13	0.0002
Secador	2	0.00000646	0.00000323	0.61	0.5514

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 88. Prueba de Tuckey de la densidad del aceite a 15°C (g/cm³) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Densidad del Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	5.28E-06
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	0.0027

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	0.914671	9	Tradicional
A	0.913899	9	Plataforma
A	0.913491	9	Parihuela

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 89. Viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	33.99	33.87	33.56	33.81
	33.65	33.13	31.94	
	35.43	32.98	35.71	
II	35.19	34.94	34.06	34.66
	35.09	35.87	31.93	
	37.54	33.73	33.63	
III	34.47	34.86	33.61	35.34
	35.24	35.38	35.84	
	33.83	37.43	37.43	
Promedio	34.94	34.69	34.19	34.61

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 90. Análisis de varianza de la viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Viscosidad Cinemática del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	13.2757704	3.31894259	1.67	0.1926
Error	22	43.7041037	1.98655017		
Corrección Total	26	56.9798741			

R2	C. V.	Raíz MSE	Viscosidad Medio		
0.232991	4.072989	1.40945	34.60481		
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	10.6740519	5.33702593	2.69	0.0904
Secador	2	2.60171852	1.30085926	0.65	0.5294

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 91. Prueba de Tuckey de la viscosidad cinemática del aceite a 40°C (mm²/s) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
 Proceso del ANOVA
 Prueba Tukey para Viscosidad Cinemática del Aceite

Alpha	0.05		
Error Grados de Libertad	22		
Error Cuadrado Medio	1.98655		
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259		
Diferencia Mínima Significativa	1.6691		
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	34.9367	9	Plataforma
A	34.6878	9	Parihuela
A	34.19	9	Tradicional

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 92. Punto de humo del aceíta (°C) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	240	255	231	242.8
	248	250	242	
	247	245	227	
II	245	235	223	230.4
	237	230	220	
	234	232	218	
III	215	222	221	222.6
	220	226	224	
	223	224	228	
Promedio	234.3	235.4	226.0	231.9

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 93. Análisis de varianza del punto de humo del aceita (°C), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Punto de Humo del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	2349.48148	587.37037	14.51	< 0.0001
Error	22	890.37037	40.47138		
Corrección Total	26	3239.85185			

R2 0.725182 C. V. 2.742993 Raíz MSE 6.361712 P. Humo Medio 231.9259

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	1869.85185	934.925926	23.10	< 0.0001
Secador	2	479.62963	239.814815	5.93	0.0087

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 94. Prueba de Tuckey del punto de humo del aceita (°C) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Punto de Humo del Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	40.47138
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	7.5335

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	235.444	9	Parihuela
A	234.333	9	Plataforma
B	226	9	Tradicional

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 95. Contenido de Impurezas del aceite (%) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	0.7836	0.7055	1.0569	0.8548
	0.7390	0.7750	1.1419	
	0.7577	0.7321	1.0010	
II	0.7200	0.7279	0.6434	0.7262
	0.9165	0.7156	0.6459	
	0.8110	0.6795	0.6755	
III	0.7836	0.7041	1.0554	0.8537
	0.7372	0.7750	1.1368	
	0.7585	0.7325	1.0005	
Promedio	0.7786	0.7275	0.9286	0.8115

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 96. Análisis de varianza del contenido de impurezas del aceite (%), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones					
Proceso del ANOVA					
Variable Dependiente: Impurezas del Aceite					
Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	0.2951578	0.07378945	5.51	0.0031
Error	22	0.29436789	0.01338036		
Corrección Total	26	0.58952569			
R2	C. V.	Raíz MSE	Impurezas Medio		
0.50067	14.25357	0.115673	0.811541		
Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	0.09845372	0.04922686	3.68	0.0418
Secador	2	0.19670408	0.09835204	7.35	0.0036

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 97. Prueba de Tuckey del contenido de impurezas del aceite (%) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA
Prueba Tukey para Impurezas del Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	0.01338
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	0.137

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	0.92859	9	Tradicional
B	0.77857	9	Plataforma
B	0.72747	9	Parihuela

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 98. Humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/Kg aceite) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	359.40	359.33	500.01	508.43
	538.16	439.89	679.32	
	418.75	540.66	740.36	
II	597.36	574.84	596.81	551.52
	536.05	279.51	574.88	
	632.36	554.61	617.30	
III	547.38	529.21	558.48	556.00
	538.10	537.73	617.30	
	557.98	558.60	559.19	
Promedio	525.06	486.04	604.85	538.65

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 99. Análisis de varianza de la humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/Kg aceite), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Humedad y Materias Volátiles del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	78430.9121	19607.728	2.51	0.071
Error	22	171730.42	7805.9282		
Corrección Total	26	250161.332			

R2	C. V.	Raíz MSE	Humedad Medio
0.313521	16.40231	88.35116	538.6507

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	12418.5547	6209.27734	0.80	0.4639
Secador	2	66012.3574	33006.1787	4.23	0.0279

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 100. rueba de Tuckey de la humedad y materias volátiles del aceite (mg H₂O/ Kg aceite) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones
Proceso del ANOVA

Prueba Tukey para Humedad y Materias Volátiles del Aceite

Alpha	0.05
Error Grados de Libertad	22
Error Cuadrado Medio	7805.928
Valor crítico para el rango de estudio	3.55259
Diferencia Mínima Significativa	104.63

Promedios con la misma letra es no significativo

Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	604.85	9	Tradicional
BA	525.06	9	Plataforma
B	486.04	9	Parihuela

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 101. Contenido de cenizas totales del aceite (%) en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Cosecha	Modelo de Secador			Promedio
	Plataforma	Parihuela	Tradicional	
I	0.008917	0.006981	0.002978	0.006414
	0.009963	0.005995	0.003999	
	0.007998	0.007920	0.002976	
II	0.006969	0.012910	0.013983	0.011837
	0.007968	0.013955	0.013946	
	0.008949	0.011988	0.015868	
III	0.010007	0.007983	0.011969	0.008858
	0.007987	0.008982	0.008941	
	0.007993	0.007917	0.007942	
Promedio	0.008528	0.009403	0.009178	0.009036

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 102. Análisis de varianza del contenido de cenizas totales del aceite (%), en función del Modelo de secador solar y la cosecha.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones

Proceso del ANOVA

Variable Dependiente: Contenido de Cenizas Totales del Aceite

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Modelo	4	0.0001365	0.00003413	5.26	0.004
Error	22	0.00014286	0.00000649		
Corrección Total	26	0.00027936			

R2	C. V.	Raíz MSE	Cenizas Medio
0.48862	28.19979	0.002548	0.009036

Fuente	Grados de Libertad	ANOVA Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F. Evaluado	Pr > F
Cosecha	2	0.00013278	0.00006639	10.22	0.0007
Secador	2	0.00000372	0.00000186	0.29	0.7537

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 103. Prueba de Tuckey del contenido de cenizas totales del aceite (%) en función de los Modelos de secador solar.

Diseño en Bloques Completamente al Azar con Tres Repeticiones			
Proceso del ANOVA			
Prueba Tukey para Contenido de Cenizas Totales del Aceite			
Alpha			0.05
Error Grados de Libertad			22
Error Cuadrado Medio			6.49E-06
Valor crítico para el rango de estudio			3.55259
Diferencia Mínima Significativa			0.003
Promedios con la misma letra es no significativo			
Grupo Tukey	Promedio	N	Modelo de Secador Solar
A	0.009403	9	Parihuela
A	0.009178	9	Tradicional
A	0.008528	9	Plataforma

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 04: Análisis proximal de las semillas del Piñón Blanco.

Cuadro 104. Análisis proximal de las semillas del Piñón Blanco.

Constituyente químico	g/100g de semilla
Humedad	4.08
Cenizas	4.98
Grasa cruda	50.33
Proteína cruda	27.13
Fibra cruda	5.12
Carbohidratos solubles	8.36

Fuente: Mejía, 2006.

ANEXO 05: Especificaciones del aceite de Jatropha.

Cuadro 105. Especificaciones del aceite crudo y refinado de Jatropha.

ANÁLISIS	ACEITE CRUDO DE JATROPHA	ACEITE REFINADO DE JATROPHA
Acidez (% Oleico)	7	0.1
Índice de Peróxidos (mg O ₂ /Kg)	4	4
Índice de Yodo (g I ₂ /100g)	110.5	110.5
Índice de Saponificación a 25°C	195	195
Índice de Refracción a 25°C	-	-
Insaponificable (%)	-	0.1
Humedad (mg/Kg)	500	300
Densidad a 15°C (kg/m ³)	919	919
Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	33.6	33.6
Fósforo (mg/Kg)	-	10
Azufre (mg/Kg)	-	10
Cenizas % (m/m)	0.002	0.002
Residuo carbonoso % (m/m)	0.024	0.024
Índice de cetano	37	37
Calor de combustión (Kj/Kg)	39.48	39.48
Poder calórico (Kcal/Kg)	9.47	9.47
Corrosión en la tira de cobre 3 horas a 50°C	1	1
Punto de inflamabilidad °C	125	125
Contenido de curcina (mg/Kg)	170	170
Color rojo		
Color amarillo	Ligth yellow	Ligth yellow
Materia Insaponificable en Éter Etílico	-	0.05
Japonés	0	0
Ácido Mirístico C14		
Ácido Palmítico C16	4.2	4.2
Ácido Esteárico C18	7	7
Ácido Oleico C18:1	43.5	43.5
Ácido Linoléico C18:2	34	34
Ácido Linolénico C18:3		
Ácido Aráquico C20		
Ácido Araquidónico C20:1		
Ácido Behénico C22		
Ácido Erúico C22:1		
Otros Ácidos	1.4	1.4
Ácidos Grasos Totales	90.5	90.5
Peso Molecular	788	788

Fuente: BIOTEL, 2010.

Cuadro 106. Análisis físico-químico del aceite de Jatropha

	Fuentes		
	CEMITEC	INT	Portugal
Densidad a 25°C (g/cm3)	0.9069	0.9082	0.9205
Índice de refracción a 25°C	1.468		14.728
Índice de Saponificación	189	167	190
Índice de Yodo	97	109.6	98
Insaponificables (%)	1.1	2.9	
Índice de Peróxido	9.98		
Punto de solidificación (°C)	< -10		13
Color ASTM	1		
Cenizas (%)	< 0.1		
Poder Calorífico Superior (Kcal/kg)	9.35	9.38	9.169
Peso Molecular Medio	866		
Viscosidad a 37.8°C (cSt)	31.5	27.3	
Carbono	76.89		
Hidrógeno	11.44		
Oxígeno	11.67		
Índice de Hidroxilo	76.6		

Fuente: CEMITEC, 2005

ANEXO 06: Densidad del agua en función de temperatura.

Cuadro 107. Densidad del agua en función de temperatura.

Grados	Densidad	Grados	Densidad	Grados	Densidad
0°	0.999868	11°	0.999637	21°	0.998019
1°	0.999927	12°	0.999525	22°	0.997697
2°	0.999968	13°	0.999404	23°	0.997565
3°	0.999992	14°	0.999271	24°	0.997323
4°	1.000000	15°	0.999126	25°	0.997071
5°	0.999992	16°	0.998970	26°	0.996810
6°	0.999968	17°	0.998801	27°	0.996539
7°	0.999929	18°	0.998622	28°	0.996259
8°	0.999876	19°	0.998432	29°	0.995971
9°	0.999808	20°	0.998230	30°	0.995673
10°	0.999728				

Fuente: Métodos oficiales de análisis, CDTA, 1977.

ANEXO 07: Ficha técnica del Piñón blanco, ecotipo Totorillayco.

Cuadro 108. Ficha técnica del Piñón blanco, ecotipo Totorillayco.

Provincia de San Martín: Sector Juan Guerra		
Localización en coordenadas		
Altitud: 230 m.s.n.m.		
Latitud = 76° 19'		
Longitud = 06° 35'		
Características destacadas de la accesión		
Hábito de crecimiento	Tipo	Erecta
Diámetro de semilla	Cm	1.245
Longitud semilla	Cm	1.985
Diámetro almendra	Cm	1.020
Longitud almendra	Cm	1.605
Cáscara	%	65.2
Semilla	%	34.8
Peso de semilla	Gr.	0.782
Susceptibilidad al stress hídrico	Nivel	Moderado
Peso de 100 semillas	Gramos	80.659
Nº de Cosechas/Año	Veces	10
Rendimiento cosecha (2do año)	Kg/planta/año	2700
Rendimiento aceite	%	50.29

Fuente: Laboratorio de Post cosecha y PIN Agroenergéticos, 2010

ANEXO 08: Costos de construcción de los secadores solares.

Cuadro 109. Costos de construcción del secador Modelo Plataforma.

Descripción	Cantidad	Unidad	Dimensiones	Características	Costo/Unit. S/. / unidad	Costo Total S/.
Costos de Materiales de Construcción						1173.08
Poste	6	unidades	3" * 3" * 1.5m	Especia quinilla	11.50	69.00
Poste	12	unidades	3" * 3" * 1.3m	Especia quinilla	10.00	120.00
Listones	11	unidades	2" * 3" * 2.1m	Especia huairuro	10.50	115.50
Listones	6	unidades	2" * 3" * 4.1m	Especia huairuro	19.50	117.00
Listones	6	unidades	2" * 2" * 4.1m	Especia huairuro	19.50	117.00
Listones	3	unidades	2" * 2" * 2.1m	Especia huairuro	7.00	21.00
Tabla	52	unidades	1/2" * 20cm * 2.1m	Especia huairuro	6.99	363.48
Clavo	2	Kg	2 1/2"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	2"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	3"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	4"	De fierro	5.00	10.00
Cola sintética	1	Galón			6.00	6.00
Rafia torcida	2	unidades		Cono	7.00	14.00
Manta de polietileno	30	m2	12m * 2.5m	Translúcida	4.50	135.00
Manta de polipropileno	22	m2	11m * 2m	Negra	2.05	45.10
Trozos de bambú	20	unidades	10m * 2.5m		0.5	10
Costos de Mano de Obra y Corriente Eléctrica						221.25
Mano de Obra	10	Jornales		No Calificada	15	150
Mano de Obra	2	Jornales		Calificada	30	60
Corriente Eléctrica	25	KWh		Monofásica	0.45	11.25
Costo Total de Construcción del Secador						1394.33

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 110. Costos de construcción del secador Modelo Parihuela.

Descripción	Cantidad	Unidad	Dimensiones	Características	Costo/Unit. S/. / unidad	Costo Total S/.
Costos de Materiales de Construcción						1324.18
Poste	6	unidades	3" * 3" * 1.5m	Especia quinilla	11.50	69.00
Poste	12	unidades	3" * 3" * 1.3m	Especia quinilla	10.00	120.00
Listones	11	unidades	2" * 3" * 2.1m	Especia huairuro	10.50	115.50
Listones	6	unidades	2" * 3" * 4.1m	Especia huairuro	19.50	117.00
Listones	12	unidades	2" * 2" * 4.1m	Especia huairuro	19.50	234.00
Listones	6	unidades	2" * 2" * 2.1m	Especia huairuro	7.00	42.00
Tabla	32	unidades	1/2" * 20cm * 2.1m	Especia huairuro	6.99	223.68
Clavo	2	Kg	2 1/2"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	2"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	3"	De fierro	5.00	10.00
Clavo	2	Kg	4"	De fierro	5.00	10.00
Cola sintética	1	Galón			6.00	6.00
Rafia torcida	2	unidades		Cono	7.00	14.00
Manta polietileno	30	m2	12m * 2.5m	Translúcida	4.50	135.00
Malla metálica	1	rollo	1/8" * 50Kg		198	198.00
Trozos de bambú	20	unidades	10m * 2.5m		0.5	10
Costos de Mano de Obra y Corriente Eléctrica						221.25
Mano de Obra	10	Jornales		No Calificada	15	150
Mano de Obra	2	Jornales		Calificada	30	60
Corriente Eléctrica	25	KWh		Monofásica	0.45	11.25
Costo Total de Construcción del Secador						1545.43

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 09: Certificado de analisis fisico-química (Analytik Service Gesellschaft, 2010).

ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss

Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie
Dotzer, Gruber, Kaiser
Am Steigbühl 2
D-90584 Allersberg

Ihr Zeichen : Gruber
Ihr Auftrag : -
Ihr Auftrag vom : 29.07.2008
Eingegangen am : 31.07.2008
Probenahme : Auftraggeber
Prüfbericht vom : 05.08.2008
Seite : 1 von 2

Prüfbericht: 164789

Prüfmuster : ID132568 zentrifugiert

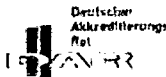
ASG-ID : 132570

Verplombung : -

Prüfparameter	Methode	Prüfergebnis	Grenzwert V DIN 51 605	Einheit
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	919,2	900 - 930	kg/m3
Flammpunkt P.-M.	DIN EN ISO 2719	256	min. 220	°C
Kin. Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	35,25	max. 36,0	mm2/s
Heizwert, unterer	DIN 51 900-2	37144	min. 36000	kJ/kg
Cetanzahl	IP 498	49,2	min. 39	-
Koksrückstand n. C.	DIN EN ISO 10370	0,16	max. 0,40	% (m/m)
Iodzahl	DIN EN 14111	101	95 - 125	g Jod/100g
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	<1	max. 10	mg/kg
Säurezahl	DIN EN 14104	0,228	max. 2,0	mg KOH/g
Oxidationsstabilität 110 °C	DIN EN 14112	11,6	min. 6,0	h
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	23,6	max. 12	mg/kg
Erdalkaligehalt (Ca + Mg)	DIN EN 14538	19,2	max. 20	mg/kg
Oxidasche	DIN EN ISO 6245	<0,001	max. 0,01	% (m/m)
Wassergehalt K.-F.	DIN EN ISO 12937	1165	max. 750	mg/kg

Thomas Wilharm
Dr. Th. Wilharm

Dieser Prüfbericht darf nicht ohne Genehmigung der Prüfeinrichtung auszusweise vervielfältigt werden.
Das Prüfgutachten bezieht sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfmuster.
Probenaufbewahrung: 4 Wochen. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen.
Akkreditiert von der DACH (Deutsche Akkreditierungsstelle Chemie GmbH) für die unter der DAB-
Registriernummer DAC-PL-0408-05-30 aufgeführten Prüfgegenstände und Prüfverfahren.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
D-86356 Neusäss

Telefon 0049 821 486 25 18
fax 0049 821 486 25 19
e-mail info@asg-analytik.de

Geschäftsführer:
Dr. Thomas Wilharm
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

